

SÉRIE A, N° 391.

N° D'ORDRE

1062.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

M. Victor CRÉMIEU,

Ingénieur agricole.

1^{re} THÈSE. — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR L'ÉLECTRODYNAMIQUE
DES CORPS EN MOUVEMENT.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 30 mai 1901, devant la Commission d'Examen

MM. LIPPMANN, *Président.*

DUCLAUX, { *Examinateurs.*
POINCARÉ, }

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Quai des Grands-Augustins, 55.

1901

SERIE A, N° 391.

N° D'ORDRE

1062.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

M. Victor CRÉMIEU,

Ingénieur agricole.

1^{re} THÈSE. — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR L'ÉLECTRODYNAMIQUE
DES CORPS EN MOUVEMENT.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 30 mai 1901, devant la Commission d'Examen.

MM. LIPPMANN, *Président.*

DUCLAUX, {
POINCARÉ, { *Examineurs.*



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Quai des Grands-Augustins, 55.

1901

UNIVERSITÉ DE PARIS.

FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS.

	MM.	
Doyen.....	DARBOUX, Professeur....	Géométrie supér.
Professeurs honoraires....	L. TRÖOST.	
	DE LACAZE-DUTHIERS..	Zoologie, Anatomie, Physiol. comparée.
	LIPPMANN.....	Physique.
	HAUTEFEUILLE.....	Minéralogie.
	BOUTY.....	Physique.
	APELL.....	Mécanique rationn.
	DUCLAUX.....	Chimie biologique.
	BOUSSINESQ.....	Physique mathéma- tique et Calcul des probabilités.
	PICARD.....	Analyse supérieure et Algèbre supér.
	H. POINCARÉ.....	Astronomie mathé- matique et Méca- nique céleste.
	YVES DELAGE.....	Zoologie, Anatomie, Physiol. comparée.
Professeurs.....	G. BONNIER.....	Botanique.
	DASTRE.....	Physiologie.
	DITTE.....	Chimie.
	MUNIER-CHALMAS.....	Géologie.
	GIARD.....	Zoologie, Évolution des êtres organisés.
	WOLF.....	Astronomie phys.
	KOENIGS.....	Mécanique physique et expérimentale.
	VÉLAIN.....	Géographie phys.
	GOURSAT.....	Calcul différentiel et Calcul intégral.
	CHATIN.....	Histologie.
	PELLAT.....	Physique.
	HALLER.....	Chimie organique.
	H. MOISSAN.....	Chimie.
	PUISEUX.....	Mécanique et Astro- nomie.
	RIBAN.....	Chimie analytique.
	RAFFY.....	Analyse et Mécán.
Professeurs adjoints.....	LEDUC.....	Physique.
	MATRUCHOT.....	Botanique.
	HAUG.....	Géologie.
	HADAMARD.....	Calcul différentiel et Calcul intégral.
	P. JANET.....	Physique (P. C. N.).
Secrétaire.....	FOUSSEREAU.	

A

MONSIEUR G. LIPPMANN,

MEMBRE DE L'INSTITUT ET DU BUREAU DES LONGITUDES,

Hommage de profonde reconnaissance.

A

MONSIEUR F. HOUDAILLE,

DOCTEUR ÈS SCIENCES, PROFESSEUR DE PHYSIQUE

A L'ÉCOLE D'AGRICULTURE DE MONTPELLIER,

Hommage d'affectueux dévouement.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

PREMIÈRE THÈSE.

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR

L'ÉLECTRODYNAMIQUE

DES CORPS EN MOUVEMENT.

INTRODUCTION.

La découverte d'Ørsted et les travaux d'Ampère ont établi une relation directe entre le courant électrique et les phénomènes magnétiques.

Depuis cette époque, sous l'empire de Faraday, Maxwell et de leurs continuateurs, on a de plus en plus cherché à établir une unité d'origine et des relations simples entre tous les phénomènes électriques.

En 1876, M. Rowland avait fait, au Laboratoire d'Helmholtz, une expérience qui établissait une relation directe entre l'électricité statique et le magnétisme.

Dans cette expérience, la rotation rapide d'un disque électrisé produisait sur une aiguille aimantée l'effet d'un courant de conduction.

Ce résultat, interprété avec les idées de l'époque, servit à décider entre les différentes interprétations proposées alors par Weber, Riemann, Clausius pour les phénomènes d'induction.

Faraday, guidé par des considérations absolument dif-

férentes, arriva aussi à cette conclusion que le mouvement d'un corps électrisé doit produire l'effet magnétique d'un courant. « Si deux balles A et B, dit-il ⁽¹⁾, sont électrisées dans des états opposés et soumises à leur influence mutuelle, il se produira au moment où elles se meuvent l'une vers l'autre, un courant ou ces effets que l'on désigne d'habitude sous le nom de *courant*. Si A vient vers B ou B vers A dans le sens opposé, un courant en résultera, qui aura dans les deux cas la même direction.

» D'ailleurs une charge existe seulement par induction et un corps électrisé est nécessairement en relation avec un autre corps électrisé en sens inverse. Donc, si une balle est électrisée positivement au milieu d'une salle, puis déplacée dans une direction quelconque, il se produira les mêmes effets que si un courant avait circulé dans la même direction. »

Maxwell ⁽²⁾ a adopté l'idée de Faraday : « Quelle que soit notre opinion sur la nature de l'électricité, il nous faut admettre que la convection électrique constitue un courant d'électricité. Toutefois on ne trouve pas, dans les relations fondamentales de sa théorie, de terme qui corresponde à cet effet de la convection.

Dans une autre partie de son Ouvrage ⁽³⁾, des considérations tout à fait étrangères au reste de ses théories l'ont amené à admettre qu'« une surface électrisée au plus haut degré, et se mouvant à la vitesse de 100^m par seconde, agirait sur un aimant avec une force égale à $\frac{1}{4000}$ environ de la force horizontale terrestre. La surface pourrait être celle d'un disque non conducteur tournant dans le plan du méridien magnétique, l'aimant pouvant être placé près de la partie montante ou de la partie descendante du disque, et serait protégé de l'action électrostatique par un écran métallique ».

⁽¹⁾ *Exp. Research*, Vol. I, art 1642 à 1644.

⁽²⁾ *Électricité et Magnétisme*, t. I, art. 231.

⁽³⁾ *Loc. cit.*, t. II, art. 770.

Mais, comme l'autre, cette idée-là n'est pas du tout essentielle à la théorie de Maxwell.

En 1884, M. Lecher ⁽¹⁾ refit l'expérience de M. Rowland et trouva un résultat négatif.

Mais en 1889, M. Himsted répéta d'une part ces expériences; MM. Rowland et Hutchinson les refirent de leur côté. Tous trouvèrent des résultats confirmant ceux des premiers essais. L'effet magnétique de la convection électrique parut donc bien établi.

Aussi, en 1892, Hertz introduisit-il dans les équations du courant total un terme correspondant à l'effet Rowland ⁽²⁾.

Quelques années avant, ce même savant avait ⁽³⁾ établi entre la force électrique et la force magnétique une réciprocité complète qu'on a considérée comme correspondant à l'unité de la force électrique. M. Blondlot ⁽⁴⁾, interprétant cette réciprocité et s'appuyant sur le résultat de M. Rowland, montra que « si deux pôles, l'un magnétique, l'autre électrique, subissent le même déplacement, ils donnent naissance au même champ ».

M. Lippmann ⁽⁵⁾ indiqua à la même époque, comme une sorte d'inverse de l'effet Rowland, l'existence d'une force pondéromotrice d'induction qui devait agir sur un corps chargé électrostatiquement, soumis à des variations magnétiques.

La même année, M. Lodge ⁽⁶⁾ entreprit des expériences pour vérifier l'existence de cet effet. Il avait été conduit à le prévoir par différentes considérations. « J'ai longtemps

(1) *Repertorium der Physik*, t. XX, p. 151; 1884.

(2) Hertz *Grundleichungen für bewegte Körper*, Leipzig, Barth; 1892.

(3) Voir POINCARÉ, *Électricité et Optique*, 1^{re} édition, Vol. III, p. 116 et suiv.

(4) *Journal de Physique*, 2^e série, t. IX, p. 177.

(5) *Comptes rendus*, t. LXXXIX, p. 151.

(6) *Phil. Mag.*, t. XXVII, p. 469; 1890.

désiré trouver quelque relation entre l'électricité statique et le magnétisme.

» L'importance de ces expériences venait de ce qu'elles me paraissaient être un criterium entre les théories de Maxwell et quelques-unes des théories allemandes actuelles, puis qu'elles me semblaient avoir trait à quelque chose de moins qu'un circuit ouvert, c'est-à-dire à pas de circuit du tout.

» Cela m'apparaissait aussi comme une sorte d'inverse de l'expérience que le professeur Rowland a récemment et si heureusement effectuée : l'expérience classique de dévier une aiguille aimantée par la rotation d'un disque chargé. »

Les résultats des expériences de M. Lodge sont assez douteux et l'on ne saurait en tirer aucune conclusion.

Pour que cet exposé soit complet, il aurait fallu citer toute une série d'expériences faites par Helmholtz en 1870 et 1876. Mais toutes ces expériences, incomplètement connues par des rapports de quelques lignes dépourvus de figures, d'ailleurs entreprises sous l'empire d'idées assez différentes des idées actuelles, avaient donné des résultats négatifs relativement aux effets magnétiques des flux d'électricité qui peuvent traverser les diélectriques sans que la conduction intervienne.

En 1897, M. Lippmann m'indiqua, comme sujet de thèse, la vérification de l'effet d'un champ magnétique variable sur un corps chargé.

Après un an et demi de recherches, faites avec les appareils et les méthodes les plus variés, j'ai constaté que l'effet attendu n'existait pas.

J'ai alors repris les expériences directes, d'abord avec une méthode différente de celle de M. Rowland, puis avec cette méthode même.

J'ai constaté ainsi qu'une charge en mouvement ne produit ni effet d'induction ni effet magnétique comparables à ceux d'un courant de conduction.

J'ai aussi retrouvé les effets observés par mes prédécesseurs et établi leur véritable cause.

J'ai entrepris ces travaux avec la certitude absolue que le premier de ces effets existait. Je n'ai même pas cherché à vérifier d'abord son existence par une expérience qualitative; j'ai cherché de suite la méthode et les appareils propres à le mesurer.

Ce n'est qu'après des échecs répétés que j'ai commencé à éprouver quelques doutes.

Je n'ai cependant rien publié avant d'avoir refait l'expérience inverse. Et je puis affirmer que je l'ai poursuivie sans aucune idée *a priori*. J'avais juste ce qu'il fallait de doute pour me pousser à refaire une expérience déjà faite, pas assez pour faire de moi un observateur qui ne veut pas voir ce qui le gêne.

Ce qui suit est le simple exposé de ce que j'ai observé et des méthodes que j'ai employées.

PREMIÈRE PARTIE.

CHAMP ÉLECTRIQUE PRODUIT PAR DES VARIATIONS MAGNÉTIQUES.

Si le flux magnétique qui traverse un circuit conducteur vient à varier, ce circuit sera parcouru par des courants induits.

Dans les théories actuelles, on admet qu'un diélectrique soumis de même à des variations magnétiques sera le siège de courants de déplacement. La composante, dans une direction quelconque de la force électrique produite, sera égale à la force électromotrice induite dans un élément de fil conducteur placé dans la même direction.

Considérons un solénoïde d'axe O et une spire de fil circulaire concentrique de rayon r . Une variation de flux $\frac{d\Phi}{dt}$ du solénoïde donnera dans cette spire une force électro-

motrice totale telle que

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

La force électromotrice tout le long du fil sera donc

$$\frac{e}{2\pi r} = - \frac{d\Phi}{dt} \times \frac{1}{2\pi r}.$$

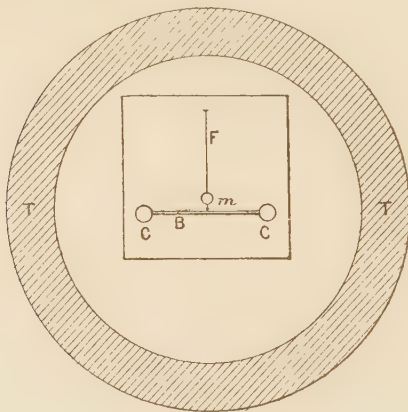
Dans le diélectrique, on devra donc avoir une force égale. Si elle agit sur un point matériel portant une charge électrique m , celui-ci tendra à se déplacer dans le sens de la force si la charge est positive, en sens inverse si elle est négative. La force pondéromotrice f sera

$$f = \frac{m}{2\pi r} \frac{d\Phi}{dt}.$$

Expériences de M. Lodge. — Les seules expériences faites en vue de vérifier l'existence de cette force sont celles de M. Lodge ⁽¹⁾.

Un tore de fil de fer TT a été enroulé de fil conducteur

Fig. 1.



isolé de façon à constituer un solénoïde électromagnétique fermé (*fig. 1*).

⁽¹⁾ *Electrostatic field produced by magnetic induction* (*Phil. Mag.*, t. XXVII, p. 469; 1889).

Au centre de ce tore, on a suspendu, à l'intérieur d'un vase de verre, une aiguille très légère formée d'un bras *B* en gomme laque, portant à ses extrémités deux petits disques conducteurs *CC*. Le système porte un miroir *m*. Ces petits conducteurs sont chargés d'électricité de signes contraires à l'aide d'un plan d'épreuve.

Si l'on vient à envoyer ou à supprimer le courant dans le tore, les flux magnétiques qui passent au voisinage des conducteurs chargés tendront à les déplacer. On voit d'ailleurs que, les charges étant de signes contraires et les variations magnétiques voisines aussi, les deux effets s'ajouteront.

Mais on ne trouve dans le Mémoire aucune donnée numérique ni aucun calcul permettant de se rendre compte de la grandeur des effets attendus.

M. O. Lodge a rencontré les difficultés suivantes :

Instabilité électrostatique du corps mobile sous l'influence des différentes spires du fil du tore, portées à des potentiels décroissants; perturbations dues aux courants de Foucault dans les conducteurs et au magnétisme ou diamagnétisme de ces conducteurs.

La dissymétrie relative de l'appareil ne semble pas avoir permis une élimination bien parfaite de toutes ces causes d'erreur.

En tout cas, M. Lodge croit avoir observé un effet très petit, qui lui semble être l'effet cherché. Voici comment il termine son Mémoire : « Cependant, en fermant le circuit avec le commutateur, le reste de l'effet électrostatique (un effet d'attraction provenant d'une dissymétrie) se trouvait certainement très réduit et l'effet désiré pourrait être vu. On le vit, en effet; le fil du spot lumineux oscillait de 2^{mm} ou 3^{mm} quand on faisait fonctionner le commutateur synchroniquement avec les oscillations de l'aiguille.

» Cet effet aidait le reste de l'effet électrostatique quand

la charge de l'aiguille avait un certain signe et il le neutralisait quand le signe était inverse.

» C'est de ce reste de quelque perturbation que dépend la preuve de la correction de ces expériences. »

On ne trouve dans ce Mémoire non seulement aucun chiffre relatif à la charge, à l'intensité du courant ou de l'induction, au couple de torsion antagoniste des mouvements de l'aiguille, mais encore on ne semble pas s'être préoccupé de vérifier si les disques restaient bien chargés. Ils l'étaient, au début, avec un plan d'épreuve, et l'air de leur enveloppe était desséché avec soin, mais on sait que cela ne suffit pas et que la charge se perd rapidement.

M. Lodge se proposait, du reste, de reprendre ces essais qui ne lui paraissaient pas très probants, mais il semble qu'il ne l'ait pas encore fait.

GRANDEUR DE LA FORCE À MESURER. — On peut produire des variations magnétiques assez considérables à l'aide de solénoïdes électromagnétiques.

Un solénoïde à âme de fer doux, ayant par exemple une section de 10^{cm} et dans lequel l'induction magnétique atteindrait la valeur de 19000, donnerait, au moment de la rupture, une force électromotrice

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - 190000 \text{ C. G. S.}$$

À une distance de 5^{cm} de l'âme du solénoïde, ceci correspondrait au même instant à une force électrique de 6333, soit

$$6333 \times 10^{-8} \text{ volt centimètre.}$$

Le corps chargé sur lequel on devra faire agir cette force devra être attaché à une balance de torsion; on voit de suite que ce corps ne pourra pas avoir de bien grandes dimensions. Si l'on suppose que ce corps soit, par exemple, une sphère de rayon r , chargée à 900 volts et placée à 5^{cm} de l'axe du solénoïde, elle serait soumise à une force

égale à

$$6333 \times 10^{-8} \times 900 \times 10^{-8} = 56997 \times 10^{-16}$$

ou environ 6×10^{-9} dyne.

On voit donc qu'il faudra suspendre à la balance de torsion des corps de grande capacité si l'on veut arriver à produire une action mesurable.

En prenant pour types les galvanomètres Thomson les plus sensibles, on voit en effet que *le couple moteur minimum est de l'ordre de 10^{-6} ergs*, et dans ces appareils le système suspendu pèse à peine 1^{er} ou 2^{gr}.

Cet exemple suffit à montrer qu'il faut employer tous les moyens de multiplication possibles.

Difficultés expérimentales. — Il fallait donc construire une balance de torsion suspendue par un fil de très faible torsion, supportant un anneau renfermé dans une enveloppe formant armature externe et en même temps écran protecteur contre les mouvements de l'air. Le centre de l'anneau serait traversé par le noyau de fer d'un circuit électromagnétique puissant.

Mais deux difficultés se présentent :

1° Tous les corps sont plus ou moins magnétiques ou diamagnétiques. Par conséquent il faut réaliser un système qui ne soit pas directement influencé par des variations magnétiques aussi considérables que celles nécessaires à l'expérience.

Il faudrait un système qui fût parfaitement symétrique par rapport au flux qui le traversera et, en même temps, parfaitement homogène au point de vue magnétique.

2° On sait qu'un corps électrisé libre ne peut être en équilibre stable dans un champ électrique. Pour obtenir un système matériel chargé, mobile dans un champ électrique sous l'action de forces très faibles, il faudra donc réaliser une sorte de condensateur dont les armatures seront rigoureusement concentriques et de révo-

lution autour de l'axe de la balance de torsion. Il faudra de plus que le système, très mobile autour de cet axe, soit parfaitement rigide dans toutes les autres directions et, en particulier, dans celles suivant lesquelles la force électrostatique tendrait à le déplacer.

On voit tout de suite, d'après ces conditions, qu'on devait réaliser un appareil tel que l'axe d'oscillation du système suspendu coïncidât rigoureusement avec l'axe du flux magnétique.

Description des appareils. — J'ai construit trois appareils successifs et essayé, pour chacun, plus de dix systèmes oscillants différents.

Je ne décrirai que le dernier de ces appareils, qui est le seul avec lequel j'aie pu opérer avec une certitude suffisante.

L'électro-aimant. — Un noyau de fer cylindrique AA (*fig.* 2) faisant partie d'un circuit magnétique fermé dont on peut voir l'ensemble sur la *fig.* 3, a été très soigneusement tourné, de façon que son axe soit rigoureusement perpendiculaire aux bases JJ. Deux bobines BB, BB à armature de laiton s'engagent à frottement doux sur le noyau AA. Les armatures de ces bobines ont été tournées très soigneusement de façon que les faces FFFF soient rigoureusement perpendiculaires à l'axe de AA et par suite parallèles entre elles. En interposant entre les deux bobines un tube LL de hauteur variable, on peut ménager entre elles un espace annulaire variable. Les faces FF sont garnies de lames de verre à faces parallèles, de 2^{mm} d'épaisseur.

La surface latérale des bobines BB est garnie d'une lame métallique qui masque les spires du fil.

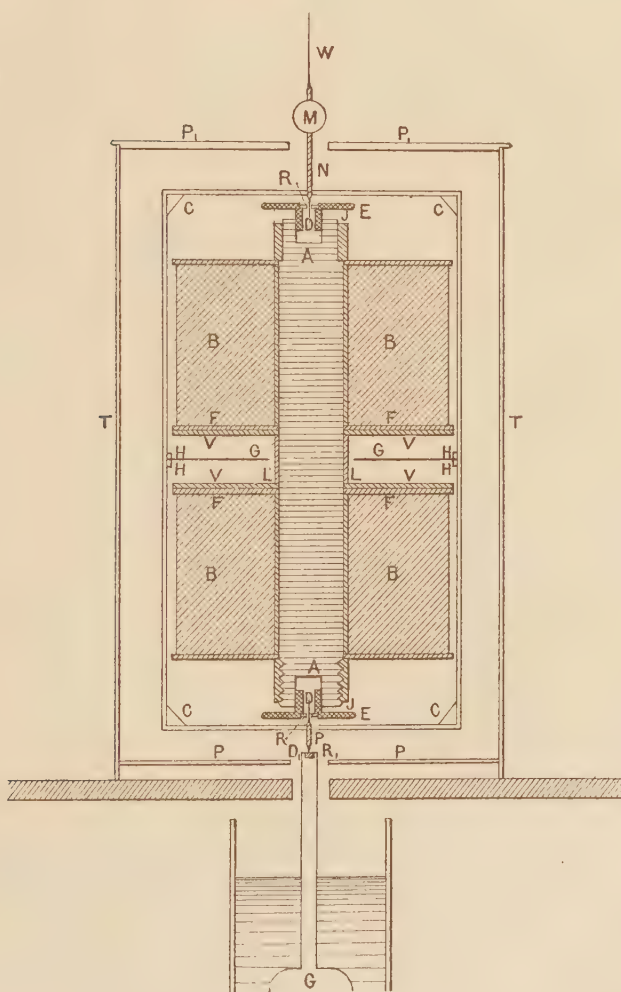
Dans les expériences, toutes ces pièces métalliques étaient constamment reliées au sol.

Le noyau AA, long de 25^{cm}, a un diamètre de 35^{mm}; sa

section est de $9^{\text{cm}},6$. Il est en fer de Suède très doux et aussi pur qu'on a pu le trouver dans le commerce.

Les bobines BB ont 9^{cm} de hauteur. Elles portent cha-

Fig. 2.

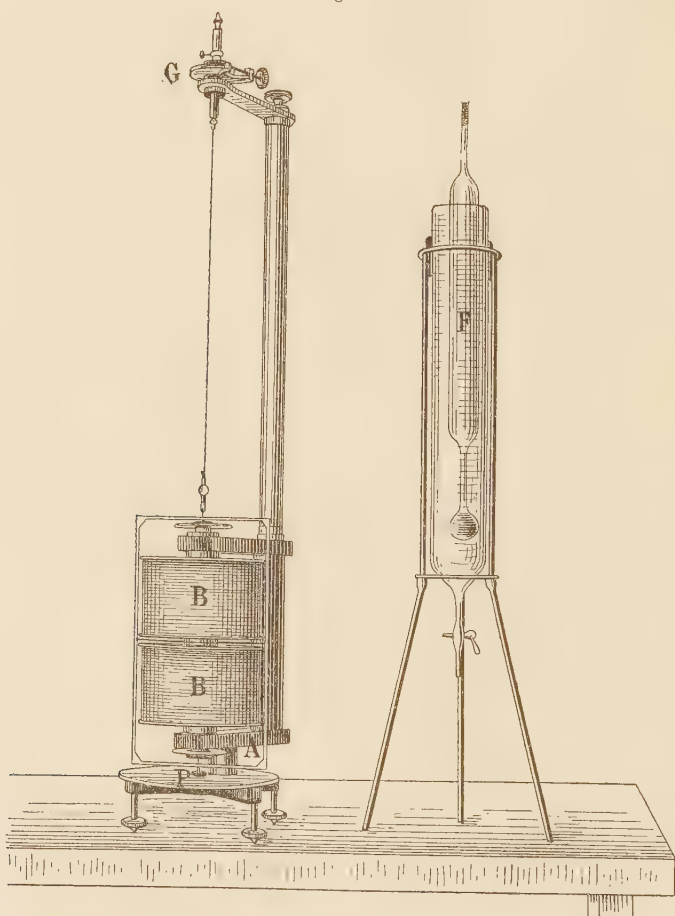


cune 2800 tours de fil de cuivre rouge de $0^{\text{mm}},8$ de diamètre, isolé par deux couches de coton-gomme laqué. Ce

fil forme quarante couches concentriques dont les diamètres extrêmes sont 130^{mm} et 40^{mm}.

La résistance de chaque bobine est de 25 ohms.

Fig. 3.



Le coefficient de self-induction est :

$$L_s = \frac{\pi^2 n^2 D^2}{L} = 65 \times 10^7 \text{ centimètres.}$$

En prenant pour la perméabilité magnétique du fer la

valeur 40, qui correspond à peu près à la valeur de la force magnétique employée, on a

$$L_s = 26 \times 10^9.$$

La balance de torsion. — Elle se compose d'un cadre rectangulaire rigide CCCC (*fig. 2*). Ce cadre a été fait successivement avec de petits tubes d'aluminium, puis avec des tubes de verre assemblés : finalement, comme il fallait une grande rigidité et une symétrie de forme parfaite, je l'ai fait construire en baguettes de verre de section rectangulaire, soigneusement travaillées et assemblées entre elles à l'aide de petites cales rectangulaires ⁽¹⁾.

Le cadre est supporté par un fil W qui s'accroche à une tige métallique N solidaire du cadre, et dont l'autre extrémité est fixée à un goniomètre de torsion que l'on peut voir *fig. 3*.

Un miroir concave de 1^m de rayon est fixé sur la tige N à l'aide d'un tube de verre paraffiné qui l'isole électrostatiquement. La charge arrive en effet par la tige N, et l'argenture du miroir, en s'électrisant, suffirait à introduire de notables perturbations.

Vers l'intérieur du cadre, la tige N se termine par un pivot d'acier roulé de 4^{mm} de longueur et de $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre.

Le côté opposé du cadre porte en son milieu une tige métallique P, terminée vers l'intérieur du cadre par un pivot d'acier identique à celui qui termine la tige N.

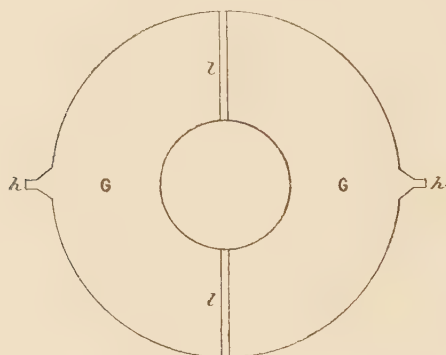
Au milieu des deux autres côtés du cadre sont collées de petites pièces de verre HH laissant entre elles un intervalle de $\frac{1}{10}$ de millimètre d'épaisseur.

C'est dans ces deux fentes que vient se fixer, à frottement doux, le disque métallique qui constituera le corps chargé sur lequel agira la force pondéromotrice.

(1) Ce cadre a été construit par M. Jobin, à l'obligeance et à l'habileté duquel je suis heureux de rendre hommage.

Ce disque, en aluminium, de $\frac{2}{10}$ de millimètre d'épaisseur, se compose de deux demi-couronnes parfaitement planes GG (*fig. 4*) reliées entre elles par deux lamelles de mica ll. Elles portent, au milieu de leur circonférence extérieure, une petite languette hh qui vient s'engager

Fig. 4.



à frottement doux entre les pièces HH du cadre de verre. Cette disposition permet de rendre le plan du disque rigoureusement perpendiculaire à celui du cadre.

Le diamètre extérieur de ce disque est de 135^{mm}, son diamètre intérieur de 48^{mm}; il pèse 6^{gr},440.

Le cadre de verre, avec ses tiges métalliques et accessoires, pèse 21^{gr},800. Pour pouvoir charger le disque, les pièces de verre HH sont garnies de petites bandes de papier d'étain et communiquent, par un fil d'argent de $\frac{1}{50}$ de millimètre avec la tige métallique N. Celle-ci est en contact métallique avec une pièce fixe reliée à une source électrique.

J'ai eu de grandes difficultés à rendre ce système mobile autour de l'axe du noyau AA, tout en évitant que les attractions électrostatiques viennent le coller contre les parois environnantes.

J'ai essayé en particulier de le maintenir entre deux

fil comme le cadre des galvanomètres Deprez-d'Arsonval; mais avec les fils très fins et très longs que j'étais obligé d'employer, la résistance aux attractions était insuffisante.

Après bien d'autres essais infructueux, je me suis arrêté à la disposition suivante : Aux extrémités du noyau AA, on a percé, rigoureusement dans l'axe, deux trous cylindriques de 15^{mm} de diamètre et de 15^{mm} de profondeur.

Deux pièces d'ébonite EE peuvent glisser à frottement doux dans ces ouvertures. La manœuvre de ces pièces est facilitée par deux rondelles métalliques molletées, de grand diamètre.

Le centre de ces pièces d'ébonite est percé d'un trou de 4^{mm} de diamètre à la partie supérieure duquel on a noyé deux rondelles de laiton dans lesquelles sont sertis des rubis percés de trous de $\frac{1}{10}$ de millimètre. Le tout est réglé de façon que ces trous coïncident avec l'axe du noyau.

De plus, les rubis sont soigneusement isolés du noyau de fer.

Les pivots d'acier DD s'engagent dans les trous des rubis et, comme ces pivots sont exactement dans l'axe du cadre et du disque, les axes des deux appareils coïncident.

Pour mettre le cadre en place, la manœuvre était la suivante :

L'électro-aimant était complètement démonté, on vissait le noyau AA sur l'armature inférieure. On plaçait ensuite la première bobine BB, puis la bague métallique LL et le disque reposant sur la face supérieure de la bobine.

La deuxième bobine était ensuite placée, puis l'armature supérieure de l'électro-aimant. Les deux pièces d'ébonite étaient alors engagées à fond dans leurs

alvéoles et les choses étaient réglées de façon que, dans cette position, la distance entre les extrémités garnies de AA était plus faible que celle entre les deux pivots DD du cadre. Celui-ci était alors présenté : on engageait le pivot supérieur, le cadre reposant sur la pièce DD. Le fil de suspension était ensuite accroché. On manœuvrait lentement les deux pièces d'ébonite de façon à amener le milieu des pivots DD dans les trous des rubis. De cette façon le cadre était guidé par deux points seulement. Il ne pouvait prendre aucune position oblique à l'axe. Il pouvait seulement tourner autour de cet axe.

On a vu que l'ensemble du cadre et de l'anneau pesait $28^{\text{gr}}, 240$; un fil suffisant pour supporter ce poids aurait eu un couple de torsion beaucoup trop considérable.

Pour obvier à cet inconvénient, j'ai d'abord fait un petit flotteur sphérique qui se fixait à la tige P et qui était calculé de façon à supporter un poids de 26^{gr} environ en le plongeant dans l'eau. Mais j'ai dû renoncer à cette disposition. Le flotteur tendait à se retourner, et, par suite, il calait les deux pivots d'acier contre les rubis : le système n'oscillait plus.

J'ai alors fait faire un flotteur allongé ayant la forme de la *fig.* 5. Ce flotteur a une hauteur totale de $52^{\text{mm}}, 5$, il déplace 241^{cc} et pèse 70^{gr} . La boule contient $141^{\text{gr}}, 7$ de mercure. Ce poids est calculé de façon que le centre de gravité du système, flotteur et cadre, se trouve placé en G, à 80^{mm} en dessous du centre de poussée du liquide sur le flotteur; en même temps ce poids de mercure est tel que le flotteur ne supporte que 26^{gr} , le reste du poids du cadre étant soutenu par le fil de suspension.

Les parois du flotteur ont été faites avec des tubes de verre choisis d'épaisseur très régulière. Le système entier, plongé dans l'eau, se maintient donc sensiblement vertical. On achevait de régler cette verticalité au cathétomètre, à l'aide du petit contrepoids mobile C.

Le flotteur était fixé au cadre par deux tubes à frottement, arrêtés par un écrou de serrage.

Il était réglé de telle façon que, lorsqu'il supportait le cadre, l'affleurement se faisait juste au point où le dia-

Fig. 5.



mètre va brusquement en augmentant. De cette manière, lorsque le disque chargé, attiré par l'armature fixe supérieure, tendait à soulever le système, la poussée du liquide sur le flotteur diminuait beaucoup pour un très faible déplacement, et le mouvement se trouvait arrêté très vite.

Cette disposition était nécessaire. La surface du disque

chargé est en effet d'environ 120^{cmq} . Pour une densité superficielle électrique égale à l'unité, la force attractive atteignait 720 dynes, c'est-à-dire le cinquième environ du poids pour lequel le flotteur était réglé.

On voit que, si l'on disposait tout ce système, réglé au préalable, à sa place autour de l'électro-aimant dont l'axe AA avait été aussi réglé vertical, les pivots d'acier seraient simplement guidés par les rubis, sans appuyer aucunement sur eux.

Mais je n'ai jamais pu en obtenir des oscillations régulières. En effet, remarquons d'abord que, par construction, le système ne peut effectuer une rotation complète autour de l'axe AA. Il est arrêté au moment où l'un des côtés verticaux du cadre vient toucher les armatures supérieures ou inférieures de l'aimant.

Dans ces conditions, le système étant supposé au repos, et non en contact avec les armatures, si l'on vient à lui donner une impulsion, il se déplacera dans un certain sens. En même temps, le flotteur entraînera partiellement le liquide. Celui-ci n'a aucune période d'oscillation. Le cadre viendra au bout d'un certain temps se coller contre une des armatures et il s'y maintiendra jusqu'à ce que le liquide soit revenu au repos. Ceci demandait en général une demi-heure. Au bout de ce temps, la torsion du fil ramenait le cadre en arrière, le liquide était entraîné en sens inverse et le même phénomène se reproduisait presque indéfiniment. D'ailleurs, même sans impulsion initiale, les variations de température de la salle suffisaient à donner des mouvements continuels au système par suite des courants de convection créés dans le liquide.

Pour tourner cette nouvelle difficulté, j'ai modifié la tige métallique P, à l'extrémité inférieure de laquelle j'ai disposé un pivot d'acier court à pointe très fine. J'ai d'ailleurs fixé, à la partie supérieure du flotteur, et nor-

malement à son axe, un contre-pivot en rubis, sur lequel le pivot d'acier venait porter.

Le flotteur, guidé par un tube d'ouverture plus large que son diamètre, ne pouvait pas quitter le cadre, mais il pouvait tourner sur lui-même. Dans ces conditions, le frottement, pourtant très faible, de la pointe d'acier contre le rubis suffisait à entraîner partiellement le flotteur, et l'on retombait sur l'inconvénient précédent.

J'ai alors empêché tout mouvement du flotteur à l'aide d'une lame métallique *ll* retenue dans une glissière verticale. Grâce à ce dispositif, le système suspendu oscillait assez régulièrement, à condition de tenir les pivots et rubis toujours bien graissés et à l'abri de la poussière. Le seul effet des pivots était d'amortir les oscillations.

L'appareil reposait sur un trépied à vis calantes sur une plaque de verre épais, percée d'une ouverture permettant le passage du flotteur; celui-ci, contenu dans un vase cylindrique, reposait sur un monolithe, ainsi que la table supportant l'ensemble de l'appareil.

Dans mes premiers essais avec des cadres métalliques, ceux-ci se chargeaient complètement, en même temps que le disque. Il en résultait des attractions assez fortes des côtés du cadre par les armatures horizontales de l'électro-aimant. C'est en partie pour éviter ces attractions que j'ai fait faire en dernier lieu un cadre en verre. Ce cadre avait été soigneusement lavé à l'eau distillée et à l'éther, puis verni avec une solution de gomme-laque très pure dans de l'alcool absolu. Le disque se chargeait par un fil extrêmement fin disposé sur le cadre, et j'avais vérifié que le verre ne se chargeait pas, à condition de le maintenir exempt de poussières et de le revernir de temps en temps.

Enfin, tout l'appareil était protégé par un écran métallique formé d'un tube en laiton *TT* (*fig. 2*) fendu en deux parties qui se rapprochaient au contact d'une plaque

inférieure PP solidaire de l'appareil et concentrique à son axe. Le tout se fermait par un couvercle métallique plan P' P'.

Le fil de suspension. — J'ai essayé tous les modes possibles de fil de suspension. J'ai fini par opérer avec du fil de quartz. Mais le maniement en est si délicat, surtout pour des fibres un peu longues, que je ne m'y résolus qu'en dernier lieu.

J'ai employé d'abord du fil de cocon, puis du fil d'argent au $\frac{1}{50}$ de millimètre.

Le fil de cocon a, pratiquement, un couple de torsion négligeable; d'ailleurs il ne donne aucune position d'équilibre stable. Le zéro varie continuellement.

Aussi me suis-je servi de bifilaires de cocon. Ceux-ci avaient tous 0^m,40 de longueur. Le couple de torsion ω d'un bifilaire est exprimé, pour un angle α , par

$$\omega = \frac{Fab}{l} \alpha,$$

dans lequel F est la force de traction, a et b l'écartement aux deux extrémités de bifilaire, l sa longueur.

Pour avoir des valeurs de ω suffisamment faibles, j'ai dû rendre a et b très petits, $\frac{4}{10}$ à $\frac{1}{10}$ de millimètre.

Un artifice très simple permet de réaliser de pareils bifilaires :

Il est bon d'abord de ne se servir que de fils qui ont supporté pendant quelques jours un poids voisin de la charge de rupture, soit 6^{gr} à 7^{gr}. Ces fils sont ensuite légèrement humectés, puis repassés avec un rouleau de laiton poli et chaud; de suite après on les frotte avec du vernis à la gomme-laque à 1 pour 100 dans l'alcool absolu. Cette dernière précaution diminue considérablement l'hygroscopicité des fils.

Deux fils ainsi préparés, et de longueur convenable, portant à leurs extrémités des poids égaux (en général 2^{gr}

à chaque bout), sont placés sur 2 V, distants de 0^m,50 environ. Les deux fils sont ainsi maintenus au contact, sous tension égale.

On les colle alors, avec un peu de golaz, sur les pièces qu'ils doivent relier. Il est bon que ces pièces soient planes et portent, dans la direction des fils, un petit trait fin coupé par quelques traits transversaux un peu plus grossiers pour avoir une meilleure prise du golaz.

Les deux fils ainsi collés, on introduit entre eux, aux deux extrémités, un morceau de fil métallique, de diamètre égal à celui choisi pour l'écartement. Ce fil a été enduit d'un peu de vernis gomme-laque épais qui suffit à le coller.

Il est bon, pour éviter l'enchevêtrement du bifilaire, de mettre sur sa longueur deux ou trois morceaux supplémentaires de ce fil métallique. La constance du zéro des bifilaires ainsi construits est tout à fait remarquable, malgré leur très faible couple de torsion.

J'ai employé des écartements variant de $\frac{4}{10}$ à $\frac{4}{10}$ de millimètre, ce qui correspondait aux couples suivants en ergs pour $\alpha = 1$ radian :

F (en dynes).	Écartement $a = b$ (en cent.)			
	0,01.	0,02.	0,03.	0,04.
Longueur 40 ^{cm} ...	981	$2,4 \times 10^{-3}$	$9,9 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^{-2}$
	1962	$4,8 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-2}$	$4,4 \times 10^{-2}$
	3924	$9,6 \times 10^{-3}$	$3,9 \times 10^{-2}$	$8,8 \times 10^{-2}$

J'ai mesuré à plusieurs reprises la valeur du couple de ces bifilaires ; je me servais pour cela d'un cylindre d'aluminium, soigneusement tourné, de diamètre de base sensiblement égal à la hauteur et pesant 4^{gr},520, dont je comptais les oscillations. Le couple mesuré était toujours sensiblement égal au couple calculé ; aussi me suis-je servi des valeurs calculées.

Le défaut des bifilaires de cocon, c'est leur variation de longueur sous l'influence de l'humidité. Quoique ces variations fussent réduites par le vernissage, elles atteignaient plusieurs millimètres par des temps très humides.

Pour les systèmes entièrement suspendus, que j'employais au début, ceci n'avait pas grand inconvénient, mais pour le cadre à flotteur qui m'a servi dans le dernier appareil, il n'en était plus de même. Une variation de quelques dixièmes de millimètre suffisait à en fausser le fonctionnement.

J'ai alors essayé pendant quelque temps d'un faisceau de trois fils d'argent de $\frac{4}{50}$ de millimètre de diamètre et de $0^m,40$ de longueur.

Un seul fil n'aurait supporté que $2^{gr},5$ à $2^{gr},7$. Le couple calculé de ce faisceau serait, en adoptant comme valeur du coefficient γ le nombre 266×10^8 ,

$$w = \gamma \frac{d^4}{l} \alpha = 3 \times 10^{-2} \text{ ergs pour un radian.}$$

Le couple mesuré était beaucoup plus fort et égal en moyenne à

$$5 \times 10^{-2} \text{ ergs.}$$

On verra que ce couple était trop considérable par rapport au couple moteur.

De plus, il est extrêmement difficile d'obtenir une tension égale des trois fils du faisceau au moment du collage. Ces fils présentent toujours entre eux des différences de recuit. Il en résulte que, au bout de peu de temps, un seul des fils supporte tout le poids et casse.

Un autre inconvénient des fils d'argent, c'est leur torsion résiduelle qui peut atteindre d'assez grandes valeurs; par suite, on n'a jamais un zéro fixe.

Pour éviter tous ces inconvénients et avoir en même temps un couple plus faible, j'ai eu recours au fil de quartz.

J'en ai employé successivement deux fibres, la première s'étant rompue par suite d'une torsion trop forte.

La longueur de ces fibres était de 0^m,38 et 0^m,39. Leur diamètre, très difficile à mesurer exactement, était certainement inférieur à $\frac{1}{100}$ de millimètre.

Elles pouvaient porter 8^{gr} sans se rompre, à la condition toutefois de prendre d'extrêmes précautions au moment de la mise en tension. Si, à ce moment-là, le fil a une torsion de plus de 20° à 25°, il casse.

La meilleure manière de procéder consiste à fixer le fil sur une lame d'aluminium un peu large, portant un trou où viendra s'accrocher le poids. On laisse la lame s'arrêter et on la fixe alors dans cette position, avec un peu de cire molle, contre une seconde lame fixe, convenablement disposée.

On s'arrange pour que le fil soit déjà presque complètement tendu.

On accroche alors le poids; sous l'action de celui-ci, la lame se détache lentement de la cire molle, et la tension se produit sur le fil sans torsion.

La fibre de quartz était fixée sur les pièces métalliques avec du golaz. Pour avoir plus de solidité, celui-ci était recouvert d'une lamelle très mince de mica, appliquée à chaud.

Dans ces conditions, j'ai obtenu une solidité très suffisante, sans être obligé d'avoir recours à la méthode de soudure de M. Boys.

Les couples des fils employés étaient respectivement pour un radian :

Longueur 38 ^{cm}	$w = 6,4 \times 10^{-3}$ ergs
» 39 ^{cm}	$w = 8 \times 10^{-3}$ ergs

Réglage de l'appareil. — La première opération était de rendre le noyau AA (*fig. 2*) vertical. On y arrivait à l'aide d'un niveau d'eau très sensible, placé sur la face J,

en réglant les trois vis calantes qui supportent l'électro-aimant. Le cadre était ensuite monté comme il a été dit plus haut et le disque ajusté dans les fentes HH. On vérifiait alors au cathétomètre que les points d'attache supérieur et inférieur du fil de suspension et les pivots DD se trouvaient sur une même verticale. La sensibilité obtenue dans ce réglage était exactement celle qu'on peut atteindre avec un très bon cathétomètre, c'est-à-dire voisine de $30''$ d'arc. On vérifiait ensuite avec le même appareil que le plan du disque GG était bien perpendiculaire à la verticale DD.

L'interrupteur. — La force qu'on pouvait obtenir en chargeant le disque et rompant ou fermant brusquement le courant excitateur de l'aimant était une force d'impulsion difficile à mettre en évidence, vu sa faible valeur.

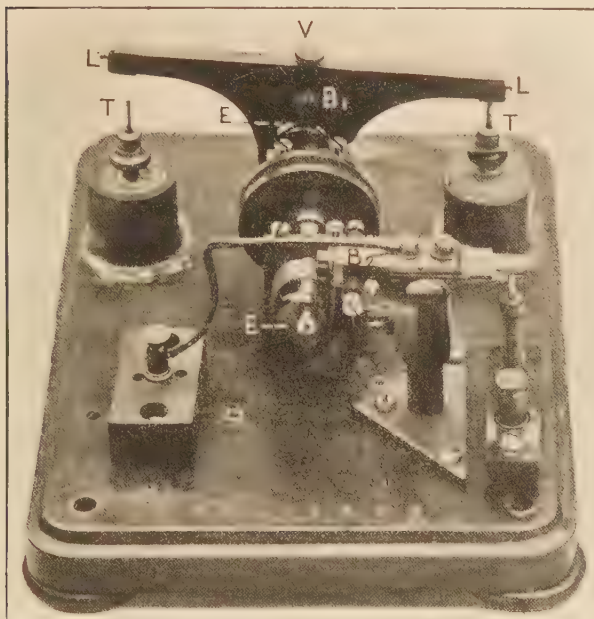
Pour augmenter l'effet et transformer l'impulsion en une déviation permanente, j'ai construit un interrupteur qui commandait à la fois le circuit de l'aimant et celui de la charge.

L'interrupteur (*fig. 6*) se compose d'un axe portant au centre une poulie de commande et, à chacune de ses extrémités, un petit excentrique de laiton E. Ces excentriques peuvent être décalés l'un par rapport à l'autre. L'un d'eux commande un balancier en ébonite B, dont les deux extrémités viennent frapper successivement l'extrémité de tiges de platine T engagées à frottement doux dans des tubes de laiton au fond desquels se trouve un ressort. La *fig. 7* montre le détail d'une de ces vis. Elles sont noyées dans des blocs de paraffine. L'une d'elles est constamment reliée au sol, l'autre à l'un des pôles de la pile de charge, dont l'autre pôle se trouve aussi au sol. Un inverseur permet d'ailleurs de permuter entre eux les contacts des pôles de la pile.

En faisant varier la hauteur de l'extrémité de la tige

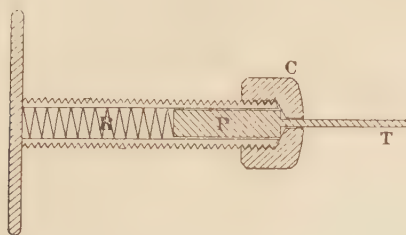
du plateau T, on peut régler à volonté la période de contact du balancier avec le sol ou la charge et aussi la

Fig. 6.



période qui sépare ces deux contacts. Ceux-ci ont lieu à l'aide d'une lamelle de laiton LL terminée à ses deux

Fig. 7.



bouts par des lames de platine. Le milieu de la lame est fixé sur le balancier d'ébonite à l'aide d'une vis de ser-

rage V à laquelle on rattache le fil qui servira à charger le disque.

L'autre excentrique E commande un balancier métallique à une seule branche, qui vient frapper sur une vis à piston identique aux précédentes et isolée. Le circuit de l'électro-aimant a été coupé en un point. L'une des extrémités de la coupure est reliée par un ressort flexible à la tige du balancier, l'autre à la vis.

Cette vis à piston est ici particulièrement utile. Convenablement réglée, elle permet de produire la rupture du circuit dans les meilleures conditions possibles pour avoir un $\frac{d\phi}{dt}$ maximum. Ces conditions sont que la rupture soit très brusque et qu'elle se produise après que le courant a atteint son régime permanent. Or, en réglant la hauteur de l'extrémité du piston de platine, on peut arriver à ce que le contact après la fermeture dure telle fraction de la période de rotation qu'on veut et, de plus, que la rupture se produise au moment où le balancier a atteint, dans son oscillation, sa phase d'accélération nulle et par conséquent de vitesse maximum.

Enfin une qualité accessoire de ce mode de contact est de réduire à leur minimum les étincelles de rupture, toujours nuisibles en pareil cas. En mettant en dérivation un condensateur de faible capacité, ces étincelles peuvent même être complètement supprimées, malgré la self-induction considérable des bobines de l'électro-aimant.

Les deux excentriques étaient décalés l'un par rapport à l'autre de façon que les différentes phases se succédaient comme suit :

Soit T la période de rotation et supposons l'appareil au repos, aucun des balanciers n'étant au contact des vis; on vient alors à faire tourner l'axe.

Le balancier B₁ vient au contact du sol; ce contact dure $\frac{T}{4}$; au milieu de sa durée, le balancier B₂ vient fermer le

circuit de l'aimant; ce contact dure $\frac{T}{2}$. Après qu'il a eu lieu, le balancier quitte le sol et vient, après $\frac{T}{4}$, au contact de la charge et y reste pendant $\frac{T}{4}$. La charge étant établie depuis $\frac{T}{8}$, le balancier B_2 rompt le circuit de l'aimant. La rupture se produit donc au moment où le disque est chargé et la fermeture lorsque le disque est au sol. En faisant tourner l'appareil en sens inverse, on aurait fait agir sur le disque l'effet dû à la fermeture. Mais on n'a jamais opéré ainsi, les conditions étant moins favorables à la fermeture qu'à la rupture.

L'interrupteur était mis en mouvement par une petite dynamo qui commandait la poulie au moyen d'une courroie en caoutchouc.

Le nombre de tours de l'interrupteur avait été réglé expérimentalement de façon à obtenir une induction maximum sur le disque. En remplaçant ce disque par des spires de fil reliées à un galvanomètre étalonné, et en faisant varier le nombre de tours par seconde, on arrive à une certaine valeur au delà de laquelle la déviation diminue. Ceci tient aux effets combinés de la self-induction des bobines de l'électro-aimant qui retarde le maximum du flux par rapport à la fermeture du circuit, et à l'hystérésis du noyau de fer qui diminue, dans une notable proportion, la variation du flux, cette diminution étant d'autant plus grande que le courant est plus intense.

Ces deux effets étant de même sens, on conçoit facilement qu'à partir d'une certaine vitesse, le courant n'a plus le temps d'atteindre son régime permanent, en même temps que le retard prend une valeur très notable.

Je ne pouvais songer à calculer *a priori*, même approximativement, quel serait ce nombre de tours. Il aurait fallu connaître les constantes magnétiques du noyau de fer et la loi exacte de variation de la force électromotrice de

rupture. Ce sont des études trop longues et en même temps inutiles, puisqu'une expérience simple donne de suite un résultat certainement beaucoup plus exact.

Mode d'expérimentation. — L'expérience consistait à faire agir sur le disque chargé la variation de flux due à la rupture du courant excitant l'électro-aimant.

Quoique le nombre de tours fût de six par seconde et que, par conséquent, la charge du disque fût à chaque instant renouvelée, je me suis toujours attaché à ce que ce disque fût très bien isolé. Pour chaque expérience je vérifiai, avec un électroscope très sensible, que le disque pouvait garder sa charge, sans perte appréciable, pendant cinq minutes au moins.

Les déviations du cadre étaient observées sur une échelle graduée où se formait l'image d'un spot lumineux dans le miroir concave M.

J'avais d'abord essayé d'opérer avec le cadre immobile au début, en cherchant par conséquent à le mettre en mouvement par l'effet de la force cherchée.

Je n'ai jamais pu y arriver. Mais il pouvait se faire que le frottement au départ, augmenté par de faibles attractions électrostatiques dissymétriques, suffît à détruire l'effet des impulsions.

J'ai alors opéré avec le cadre déjà animé d'oscillations régulières.

La durée de ces oscillations était, suivant le couple de torsion du fil de suspension, de trois à neuf minutes.

D'ailleurs, par suite du frottement des pivots, l'amortissement était assez notable. Le système oscillait pendant environ une heure. Il fallait, pour pouvoir observer un déplacement du zéro, faire des lectures correspondant à des oscillations s'effectuant dans les limites de l'échelle. Comme leur nombre était très limité, les observations étaient assez pénibles.

Voici le procédé expérimental suivi :

On lançait le cadre en soufflant légèrement sur une de ses branches à l'aide d'un tube de caoutchouc relié à une poire placée à portée de l'observateur.

Les oscillations une fois réduites aux limites de l'échelle, on faisait trois lectures pour avoir la position du zéro et le décrément.

Puis on faisait agir d'abord la charge seule pour vérifier qu'elle ne modifiait pas la position du zéro. Une lecture suffisait à cette vérification.

On opérait ensuite de même pour la variation du flux seule.

On faisait alors agir simultanément ces deux effets et l'on faisait trois lectures.

D'ailleurs ces lectures se trouvaient en quelque sorte complétées par l'observation continue du spot. La vitesse de celui-ci était assez lente et régulière dans une même région, de sorte que la moindre variation de régime correspondait à un changement d'allure.

Résultats observés. — Les résultats observés ont été constamment négatifs, quels que fussent l'appareil employé, le mode d'expérimentation et d'observation et la grandeur de l'effet attendu.

Expérience de vérification. — L'extrémité supérieure du fil de suspension était fixée à un goniomètre de torsion. Un petit dispositif très simple permettait de le manœuvrer à distance.

En lui donnant une torsion correspondant à la valeur du couple moteur, je vérifiais que le cadre obéissait et prenait la déviation attendue.

Avec les bifilaires et avec le fil de quartz cette vérification réussissait toujours. Elle échouait souvent avec le faisceau de fils d'argent.

Autres modes d'expérimentation essayés. — Pour éviter l'interrupteur, j'ai essayé de me servir d'une bobine

d'induction excitée par du courant alternatif à 40 périodes.

Le primaire de la bobine était en tension avec les bobines de l'électro-aimant, le disque était relié à l'une des extrémités du secondaire, l'autre extrémité était au sol. A l'aide d'une capacité variable et de deux bobines de self réglables, il était facile d'établir entre l'intensité primaire et la force électromotrice induite un décalage tel que le maximum de vitesse de variation de la première coïncidât avec le maximum de la seconde.

On voit d'ailleurs que le sens du flux changeait en même temps que le signe de la charge.

J'ai essayé de ce système avec le dernier appareil, et surtout avec le précédent, dans lequel les bobines de l'aimant étaient à très gros fil (4^{mm}) et à faible nombre de tours.

J'ai dû y renoncer, parce que le système chargé oscillant prenait une vibration de bas en haut, synchrone de la période du courant. Cette vibration empêchait toute observation.

J'ai employé quelque temps, au lieu du disque décrit, six sphères d'aluminium creuses, fixées aux extrémités de six tiges, à 60° les unes des autres.

Ces tiges étaient vissées par leur autre extrémité à une tige verticale suspendue au centre du noyau de l'électro-aimant, qui avait été convenablement évidé.

Avec ce système, le courant alternatif ne produisait plus la vibration de bas en haut, et j'avais pu faire quelques séries. Toutes avaient donné un résultat franchement négatif, quoique les déviations attendues fussent déjà appréciables.

Une autre raison m'a fait renoncer à l'emploi du courant alternatif. On sait que la force électromotrice induite dépend de la vitesse de variation du flux. Or, dans l'appar-

reil que j'employais, la self-induction déjà considérable de la bobine d'induction s'ajoutait à la self-induction du solénoïde variable.

La force électromotrice résultante dans une spire de fil mise à la place du corps chargé n'atteignait pas une valeur très considérable. Ceci est assez naturel, puisque le coefficient d'induction mutuelle était forcément très faible.

Avec un interrupteur comme celui que j'ai employé, on peut au contraire rendre aussi brusques qu'on le désire les changements de régime du courant.

Valeur numérique du couple moteur. — Nous avons vu que la force pondéromotrice d'induction a pour expression

$$f = \frac{m}{2\pi r} \frac{d\varphi}{dt}.$$

Les quantités qui figurent dans cette expression ont toujours été mesurées et c'est d'après les valeurs mesurées qu'étaient calculées les déviations attendues. Je donnerai seulement les chiffres relatifs aux derniers essais faits avec l'appareil décrit en détail, en indiquant rapidement les méthodes employées pour les mesures.

Charge du corps. — On a

$$m = CV,$$

C étant la capacité, V le potentiel de charge.

La charge était fournie par une batterie de 3000 accumulateurs installée au Laboratoire d'enseignement, et que M. Bouty avait eu la bonté de mettre à ma disposition. La valeur de V était par suite connue, à 2 volts près, par le nombre d'accumulateurs employés.

Quant à la capacité, je l'ai mesurée avec une méthode électrométrique de zéro, par comparaison avec une capacité étalon à anneau de garde.

L'électromètre était à cadran du type Boudréau, à iso-

lement à la paraffine. Il permettait d'apprécier des variations de $\frac{4}{50}$ de volt.

Quant à la capacité étalon, la vis micrométrique qui réglait l'écartement des plateaux donnait le micron. On pouvait par suite apprécier facilement une unité électrostatique.

Voici les valeurs trouvées dans quelques cas :

Lames de verre de 2^{mm}. Intervalles de 2^{mm} entre le disque et les faces du verre. $C = 82$ C.G.S.

Lames de verre 2^{mm}. Lames d'air 3^{mm}. $C = 61$ C.G.S.

Plus de verre. Lames d'air de 5^{mm}. $C = 43$ C.G.S.

Pour le potentiel de charge, je n'ai pu dépasser la densité superficielle électrostatique 1 à 1,1. Au delà de cette valeur, les attractions devenaient assez fortes pour dérégler le système. Aussi la charge du disque était toujours sensiblement la même; elle variait entre 250 et 280 C.G.S. électrostatiques.

Le potentiel de charge était de 1000 à 1800 volts.

Mesure du flux moyen par seconde. — Pour transformer l'impulsion en déviation permanente, j'ai dit que j'avais employé un interrupteur.

J'ai remplacé l'anneau chargé par un anneau identique, mais ouvert sur un seul côté, les bords de la coupure plongeant dans deux godets de mercure reliés à un galvanomètre.

L'interrupteur servait alors à rompre le circuit du galvanomètre au moment soit de la rupture, soit de la fermeture du courant des bobines de l'aimant. J'ai recherché ainsi à quel nombre de tours de l'interrupteur correspondait la force électromotrice induite maximum. J'ai trouvé que c'était entre cinq et six interruptions par seconde. J'avais ainsi une certaine déviation permanente.

D'ailleurs, le galvanomètre avait été préalablement étalonné par la méthode suivante :

Sur l'axe de l'interrupteur, j'avais fixé un disque

d'ébonite portant enroulées 500 spires de fil de cuivre, de section moyenne $S = 69^{\text{e}}\text{m}^2$ et ayant une résistance totale égale à 315 ohms.

Les extrémités de ce fil sont reliées à un collecteur disposé sur l'axe de l'interrupteur de façon à fermer le circuit de la bobine sur le galvanomètre à chaque demi-tour du cadre. Celui-ci tournant avec la même vitesse que pour l'interruption, on notait la déviation obtenue.

Connaissant la valeur de la composante verticale du magnétisme terrestre, et les constantes des différents appareils, on calculait facilement le flux dû à l'aimant.

J'ai ainsi trouvé, comme moyenne de vingt mesures, et pour une force électromotrice de 110 volts aux bornes de l'électro-aimant, la valeur 230850 C. G. S. électromagnétiques.

Cette vitesse de variation de flux correspond, en chaque point de la région moyenne du disque chargé, dont le diamètre serait 91^{mm} , à un champ électrique égal à 8100 unités C. G. S., soit 81×10^{-6} volt-centimètre.

Les deux bobines de l'électro-aimant étaient en dérivation l'une sur l'autre, pour avoir une force électromotrice plus grande. D'ailleurs, dans toutes ces mesures comme dans les expériences, un condensateur était placé en dérivation sur le circuit de l'aimant de façon à annuler l'effet de la self-induction. Ce condensateur faisait, du reste, disparaître presque complètement l'étincelle de rupture.

Malgré ces précautions, le flux, calculé d'après les constantes des bobines et en admettant, comme valeur de l'induction dans le fer doux, le chiffre 5000 (chiffre admis industriellement dans les calculs d'alternateurs et de transformateurs), était cinq fois supérieur à celui mesuré. J'aurais eu certainement intérêt à faire des bobines à plus gros fil et avec un nombre de spires moins considérable.

Valeur du couple moteur. — Malgré ce défaut, on voit que la valeur de la force était appréciable. On a, en effet,

en négligeant les derniers chiffres,

$$f = \frac{m}{2\pi r} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{250}{3 \times 10^{10}} \times 8100 = 657 \times 10^{-7}.$$

Cette force agit au bout d'un bras de levier égal à 4,55 et donne un couple dont le travail pour un radian est

$$3 \times 10^{-4} \text{ ergs.}$$

Déviation calculées. — Tous les nombres qui suivent sont approchés par défaut.

	Travail du couple moteur pour un radian.....	3×10^{-4} ergs.
<i>Couple antagoniste.</i>	Bifilaire. Écartement 0,02. Poids tension 4 ^{gr} . Période d'oscillation 3'50".	$3,9 \times 10^{-2}$ (a)
	Faisceau de fils d'argent. Poids supporté 3 ^{gr} ou 4 ^{gr} . Période d'oscillation 3'19".	5×10^{-2} (b)
	Fil de quartz. Poids supporté 4 ^{gr} . Période d'oscillation 9'20".	$6,4 \times 10^{-3}$ (c)

Les déviations sont observées avec un miroir concave de 1^m,10 de rayon. Une déviation de 1°, doublée par la réflexion, correspond donc, sur l'échelle, à un déplacement de 36^{mm}.

Les déviations attendues étaient

$$\begin{aligned} (a) \quad & \frac{3 \times 10^{-4}}{3,9 \times 10^{-2}} \text{ radian} = 0,0076 \text{ radian} = 26', \\ (b) \quad & \frac{3 \times 10^{-4}}{5 \times 10^{-2}} \quad \gg \quad = 0,006 \quad \gg \quad = 24', \\ (c) \quad & \frac{3 \times 10^{-4}}{6,4 \times 10^{-3}} \quad \gg \quad = 0,046 \quad \gg \quad = 158' = 2^{\circ}38'. \end{aligned}$$

Déplacements correspondants sur l'échelle :

$$\begin{aligned} (a) \quad & 15^{\text{mm}}, \\ (b) \quad & 14^{\text{mm}}, \\ (c) \quad & 94^{\text{mm}}. \end{aligned}$$

Déviation observées. — Constamment nulles.

DEUXIÈME PARTIE.

RECHERCHES SUR L'EFFET MAGNÉTIQUE DE LA CONVECTION
ÉLECTRIQUE.

Le résultat négatif des expériences précédemment décrites m'a amené à étudier de plus près les expériences directes. Celles-ci m'ont semblé présenter un grand nombre de causes d'erreur; j'ai donc entrepris de les refaire.

J'en donnerai d'abord une description et une critique sommaire.

Premières expériences de M. Rowland. — Les premières expériences de M. Rowland furent faites à Berlin, en 1879, au laboratoire d'Helmholtz.

Quelque temps avant, Helmholtz avait cherché sans succès à mettre en évidence les forces électromotrices induites par un circuit ouvert ⁽¹⁾. Le premier Rapport sur les expériences de M. Rowland fut rédigé par Helmholtz ⁽²⁾. M. Rowland fit ensuite un Rapport personnel ⁽³⁾ auquel je me suis reporté pour ce qui suit.

L'appareil de M. Rowland se composait d'un disque d'ébonite de 21^{cm} de diamètre, de 5^{mm} d'épaisseur, tournant autour d'un axe vertical avec une vitesse de 61 tours par seconde.

Ce disque, doré sur ses deux faces, la dorure ne venant pas jusqu'à l'axe, tournait entre deux plateaux de verre de 24^{cm} de diamètre, dorés sur la face qui regardait le disque et distants du disque de 6^{mm}.

Le disque était chargé par des pointes reliées à une batterie de bouteilles de Leyde, dont on mesurait le potentiel avant et après l'expérience par la distance explosive. Le

⁽¹⁾ *Pogg. Ann.*, t. CLVIII, p. 87; 1876.

⁽²⁾ *Pogg. Ann.*, t. CLVIII, p. 487.

⁽³⁾ *American Journal of Sciences*, Vol. XV, p. 30; 1878.

potentiel moyen du disque était supposé égal à la moyenne de ces deux mesures.

Un système astatique, composé de deux aiguilles aimantées longues de 15^{mm} collées sur un fil d'aluminium de 18^{cm} de longueur, était suspendu par un fil très fin, de façon que l'aiguille inférieure, protégée par une boîte de laiton de tout effet électrostatique, fût perpendiculaire au rayon du disque. La distance au plan du disque était de 2^{cm} et sa distance au centre variait, suivant les expériences, de 9^{cm} à 7^{cm} , 6.

Un aimant directeur permettait d'orienter le système.

En faisant tourner le disque chargé on devait obtenir une déviation permanente, et cette déviation devait se produire en sens inverse si, laissant tourner le disque, on changeait le sens de la charge.

Après avoir éliminé, par des précautions nombreuses, les perturbations, attribuées au *magnétisme de rotation*, de l'axe d'acier du disque au repos, M. Rowland parvint à obtenir des déviations de 7^{mm} à 8^{mm} , se produisant dans le sens voulu, et paraissant s'accorder assez bien avec les prévisions du calcul. Toutefois l'effet de l'axe ne put être éliminé complètement.

Le potentiel de charge étant de 10 000 volts et la densité superficielle de 4, 5 C.G.S. environ, l'intensité des courants de convection réalisés était de l'ordre de 10^{-5} ampère.

Ce n'est cependant pas sans de très grandes difficultés que la déviation fut obtenue. « Dans les premières expériences, dit M. Rowland, on n'observa aucun effet autre qu'une déviation qui se renversait avec la direction du mouvement. On finit par trouver que la cause de cette déviation était due au magnétisme de rotation de l'axe. On la diminua considérablement en réduisant à 9^{mm} le diamètre de cet axe. En rendant alors l'aiguille plus sensible et en prenant plusieurs autres précautions, un effet

visible de plusieurs millimètres fut observé quand on renversait l'électrisation ; cet effet se distinguait de l'effet du magnétisme de rotation en maintenant le mouvement constant et renversant l'électrisation. Comme l'effet dû au magnétisme de rotation était plusieurs fois égal à celui dû au mouvement de l'électricité, et comme l'aiguille était extrêmement sensible, les résultats numériques furent très difficiles à obtenir et c'est seulement après des semaines d'essais que des résultats suffisamment exacts purent être obtenus. Mais une fois obtenu, l'effet qualitatif ne fit jamais défaut. Dans des centaines d'observations s'étendant sur plusieurs semaines, l'aiguille répondit toujours à un changement d'électrisation du disque. »

On peut faire à ces expériences l'objection suivante :

Les déviations obtenues, tout en se produisant dans le sens voulu, sont très faibles. M. Rowland lui-même dit que l'effet qualitatif n'a jamais manqué, mais il ne dit pas combien de fois il y a eu accord entre le calcul et l'effet quantitatif.

Or, avec la sensibilité de son appareil (1° pour une force de 3×10^{-7}) il est matériellement impossible d'obtenir un zéro fixe. Tous ceux qui se sont servis du galvanomètre ont pu constater que ce zéro varie de plusieurs divisions dans le cours d'une expérience. Cette variation peut atteindre facilement la valeur moyenne des effets observés par M. Rowland. Pour avoir une certitude, il aurait fallu que les déviations calculées fussent d'un ordre bien supérieur à celui des déviations habituelles d'un système astatique sensible laissé à lui-même.

De plus, aucune précaution spéciale ne semble avoir été prise pour s'assurer que l'ébonite laissée nue entre l'axe et la dorure suffisait à isoler la dorure de l'axe.

Pour des potentiels de 10000 volts l'ébonite ne suffit pas en général à donner un isolement parfait. Il faut très fréquemment en racler la surface, la laver à l'eau pour

dissoudre l'acide sulfurique qui a pu se former au contact de l'air. D'ailleurs un peu de poussière et quelques jours d'exposition à l'air suffisent pour que l'isolement ait à nouveau disparu.

D'autre part, la valeur du potentiel de charge du disque était déduite d'une distance explosive et, par conséquent, inexactement connue. De plus, le disque se chargeait à l'aide de pointes situées à $\frac{1}{3}$ de millimètre de sa surface; il prenait donc un potentiel sensiblement plus faible que celui de la source. Dans les calculs on n'a pas tenu compte de ces faits.

Expériences de M. Lecher (1). — Voici textuellement le Rapport fait au sujet de ces expériences :

« Le Dr Lecher parle d'abord des expériences de M. Rowland. Dans les expériences de ce savant, le disque électrisé tournait horizontalement, et l'aiguille aimantée se trouvait placée perpendiculairement au rayon du disque : dans les expériences actuelles, le disque était dans un plan vertical, tournant autour d'un axe horizontal; l'aiguille aimantée était placée parallèlement au plan du disque, suspendue près de son centre. L'aiguille était séparée du disque par un tube de verre entouré d'une enveloppe métallique reliée au sol.

» On a employé des disques en laiton, puis en carton graphité, puis en ébonite, de manière à être isolés de l'axe d'acier. La charge se faisait avec un petit balai métallique; un commutateur spécial relié à une machine de Holtz permettait d'en inverser le signe.

» Le diamètre du disque était de 0^m, 22, le potentiel de 5000 volts environ.

» La vitesse de rotation était très grande. Le nombre minimum de tours atteignait 200 par seconde. L'aiguille ai-

(1) *Loc. cit.*, p. 1.

mantée, rendue très astatique, s'observait à l'aide d'un miroir.

» Or la charge électrique du disque semble, dans ces recherches, ne produire aucun effet au repos ou en mouvement. »

Cette description est trop sommaire pour qu'on puisse se rendre compte de la valeur du résultat.

Expériences de M. Himstedt. — Pour décider entre les conclusions contradictoires de M. Rowland et de M. Lecher, M. Himstedt a d'abord repris les expériences telles que M. Rowland les avait faites, mais avec une vitesse plus grande : 120 tours par seconde.

L'élongation double (obtenue en renversant le signe de la charge électrique) était de 53^{mm} sur une échelle placée à 3^m, le disque étant chargé à 15 000 volts environ.

M. Himstedt n'avait pu trouver d'ébonite non magnétique, et, d'autre part, les courants induits dans la dorure ou l'argenture lui donnaient, au moindre changement de vitesse, des déviations plus grandes que celles dues à la convection.

Il avait par suite employé un disque de verre dépoli et recouvert de graphite sur ses bords.

M. Himstedt fit ensuite construire un appareil plus complet.

Il se composait de deux disques de verre de 0^m,20 de diamètre, tournant dans un plan vertical autour d'un même axe. Ces disques pouvaient d'ailleurs tourner dans le même sens ou en sens inverse. Ils étaient recouverts de graphite sur une couronne périphérique de 0^m,03 de largeur. Ces disques tournaient devant des plateaux de verre fixes recouverts d'étain sur la face regardant le disque : l'étain était relié au sol.

Le système astatique était fait de deux aiguilles aimantées, collées sur une feuille de mica de 35^{mm} de longueur. Il était entouré d'une enveloppe métallique reliée au sol

et suspendue entre les deux disques tournant de façon qu'une des aiguilles fût juste au-dessus des couronnes graphitées, et l'autre juste en dessous. De cette façon, l'effet des couronnes s'ajoutait sur le système astatique.

D'ailleurs, toutes les précautions étaient prises pour éviter que les trépidations dues aux disques tournants ne pussent se transmettre au système.

Le potentiel du disque était mesuré à l'aide d'un électromètre d'Edelmann, et la charge fournie par une batterie de onze grandes bouteilles de Leyde en relation continue avec une petite machine à influence.

La sensibilité du système astatique n'était pas très grande, mais M. Himstedt ne donne aucune indication sur sa valeur.

Les déviations obtenues avec cet appareil étaient nulles pour le disque au repos et très grandes pour le disque en mouvement. La valeur des impulsions obtenues pour l'inversion de la charge atteignait 100^{mm} à 1^{m} de distance pour un potentiel de 4100 volts et une vitesse de 117 tours par seconde.

L'auteur a vérifié que la grandeur des impulsions est proportionnelle à la vitesse de rotation et au potentiel de charge.

Toutefois cette proportionnalité cesse quand le potentiel dépasse une certaine valeur (4500 volts).

M. Himstedt n'a pu en trouver la cause et l'attribue à ce que « à partir d'une certaine valeur de la densité électrique, l'électricité n'adhère plus complètement à son support pondérable ».

On a vérifié dans ces expériences que les deux disques, chargés au même potentiel et tournant en sens inverse, annulaient sensiblement leurs effets magnétiques sur le système astatique.

C'est là la seule partie un peu probante de ces expériences.

Tout le reste n'a guère de valeur, parce que M. Himstedt s'est attaché « à rechercher une grande sensibilité sans s'inquiéter d'arranger son appareil de façon à pouvoir calculer les résultats attendus ».

Tout ce que nous savons sur le système astatique, c'est qu'il n'était pas particulièrement sensible.

J'ai employé, pour des expériences décrites plus loin, les systèmes astatiques les plus sensibles qu'on puisse construire. Avec les sensibilités maxima, je n'ai pu mettre en évidence, avec certitude, que des courants de 5×10^{-5} ampères circulant dans une seule spire placée à 3^{cm} de l'aiguille inférieure du système. Celui-ci portait un miroir de 4^m de rayon qui donnait sur une échelle un déplacement de 18^{mm} à 20^{mm}. A 1^m on aurait eu, par conséquent, environ 5^{mm}, et cette déviation est justement de l'ordre de grandeur des changements du zéro continuel d'un système magnétique sensible.

Or, en calculant approximativement et par excès, d'après la figure annexée au Mémoire de M. Himstedt et les quelques chiffres qu'il indique, l'intensité des courants de convection qu'il réalisait, j'ai trouvé qu'ils variaient entre 5×10^{-5} et 10^{-5} ampères. Je ne crois pas que le système magnétique de M. Himstedt pouvait donner, pour de pareils courants, des impulsions de 40^{mm} à 100^{mm} à 1^m de distance ; celles-ci étaient probablement dues à une autre cause.

D'autre part, aucune précaution spéciale n'était prise pour isoler la couche graphitée, et l'on sait à quel point le verre est conducteur pour de hauts potentiels. D'où incertitude sur la charge du disque.

Enfin, M. Himstedt observait les élongations et il ne parle pas de déviations permanentes. C'était cependant ces dernières qui étaient intéressantes.

Ces expériences ne réalisent donc pas un progrès réel sur celles de M. Rowland.

Secondes expériences de MM. Rowland et Hutchinson (1). — Cette seconde série d'expériences fut entreprise à Baltimore, où M. Rowland était professeur de Physique. La raison en était que, « dans les expériences de Berlin, il n'avait pas été possible de faire les mesures avec toute l'exactitude désirable ».

On trouvera ci-contre (*fig. 8*) une reproduction du schéma de l'appareil donné dans le *Philosophical Magazine*, avec une légende explicative.

Les perfectionnements sont les suivants :

On a employé deux plateaux verticaux, tournant l'un en face de l'autre, l'aiguille inférieure du système astatique étant comprise entre les deux, à la hauteur de leur centre. Ceci permettait d'avoir un champ magnétique plus constant.

Le diamètre des plateaux était de 20^{cm}. Leur vitesse de rotation de 125 tours par seconde. Ils étaient entourés d'anneaux de garde. Le potentiel de charge était de 5500 à 7900 volts et la densité superficielle de 1,08 à 1,47 C.G.S. électrostatique.

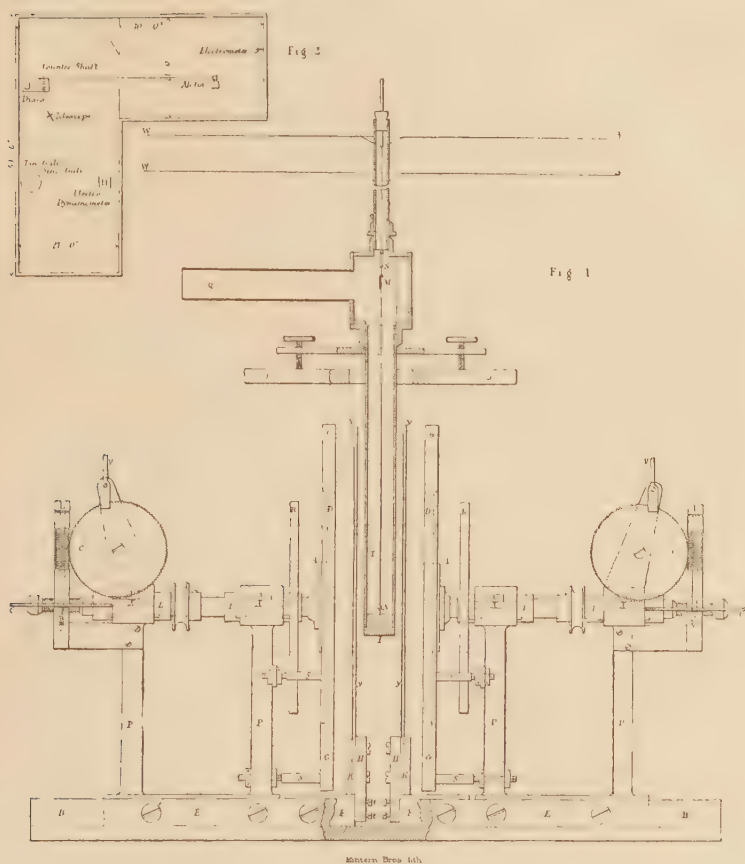
Le potentiel, fourni par des batteries de bouteilles de Leyde, était mesuré par un électromètre absolu et par conséquent connu avec plus de certitude que dans les premières expériences.

Une autre amélioration était qu'on pouvait amener, à la place du disque chargé, un disque de mêmes dimensions sur lequel était enroulée une double spire de fil, ce qui permettait de mesurer directement la sensibilité du système astatique, sans rien changer dans l'appareil. Cette sensibilité variait entre 1,5, 10⁵ et 3,10⁵.

Le disque se chargeait au moyen de vis fixées à sa périphérie et frottant contre des balais fixés dans les anneaux de garde.

(1) *Philosophical Magazine*, t. XXVII, p. 445; 1889.

Fig. 8.



Appareil de MM. Rowland et Hutchinson.

- Fig. 1. — DD disques tournants.
 GG anneaux de garde.
 YY plateaux de verre formant armature.
 LL axe de rotation des disques.
 CC compteurs de tours.
 NN système astatique.
 M miroir.
 T tube protecteur du système astatique.
 WS aimants directeurs.
 AA surface métallique où se fixent les disques DD.
 RR disques portant les spires de fil servant à étalonner le système astatique.
 OO tablette fixée au mur et supportant le système astatique.

Fig. 2. — Schéma de la disposition des appareils.

On obtint encore une déviation changeant de sens avec l'électrisation, et ne se produisant pas lorsque le disque était au repos. Mais les déviations obtenues ne s'accordaient pas avec le calcul.

Les auteurs pensent que ce désaccord provenait d'une charge située sur la face postérieure de la couche métallique du disque : l'extrémité de l'axe (*fig. 8*) vient très près de cette surface et doit former avec toutes les pièces d'acier un condensateur d'une certaine capacité avec la face postérieure de la feuille d'or.

On pourrait faire observer ici que l'influence de cette charge était très faible, le diamètre de la partie nuisible ne dépassant pas, d'après la figure, 7^{cm}.

Cette surface nuisible, égale à 57^{cm²}, avec une vitesse moyenne de 13^m par seconde, était négligeable vis-à-vis du reste de la surface de 260^{cm²} avec une vitesse moyenne de 40^m. Il aurait été très simple de supprimer la couche d'or du cercle : l'effet n'en aurait guère diminué. On a préféré procéder autrement.

« Ceci rendit nécessaire un changement dans la manière d'opérer; on mit les disques au sol et l'on changea les plateaux de verre argentés situés en face. Mais alors on trouva toujours les déviations plus grandes avec le sens de rotation positive (zénith, nord, nadir, sud) qu'avec le sens inverse. Ceci pouvait être dû aux balais de contact. On les enleva donc, et le contact à la terre fut assuré à l'aide d'une vis qui traversait le centre du disque en touchant la couche métallique et venait se visser dans l'axe. Ceci ne produisit aucune différence; les déviations pour des rotations négatives étaient toujours plus petites. »

Les chiffres obtenus avec cette disposition s'accordent à peu près avec le calcul. Si l'on s'en sert pour calculer la valeur de V , on trouve des nombres variant de $2,26 \times 10^{10}$ à $3,74 \times 10^{10}$.

Mais les déviations variant entre 5^{mm} et 9^{mm},4, avec une valeur moyenne de 6^{mm},4, sont toujours de l'ordre

des variations du zéro que présente un système astatique très sensible.

Les objections relatives à l'isolement de l'ébonite sont à répéter pour ces expériences, et une objection nouvelle se présente :

Les disques tournants étaient reliés au sol, et ce contact avait lieu de telle sorte que les secteurs de la couche dorée, tous reliés à l'axe, communiquaient complètement entre eux. La couche électrique inductrice était immobile sur les plateaux chargés placés en face ; on ne voit pas très bien comment la couche induite sur le disque mobile pouvait être entraînée. Il semble plutôt que cette couche métallique se déplaçait au travers de l'électricité et qu'il n'y avait, par conséquent, pas convection.

On peut remarquer aussi que la densité superficielle n'a jamais dépassé 1,47 C.G.S. Or l'appareil était construit de façon que cette densité, et par suite l'intensité du courant de convection, pouvait être triplée ou quadruplée. La distance entre les disques et leurs armatures (12^{mm} à 18^{mm}) était suffisante pour permettre de charger à 15 000 ou 20 000 volts. La déviation moyenne aurait pu ainsi atteindre 19^{mm} à 25^{mm} , et, si on l'avait observée, aucun doute n'aurait pu subsister.

Il est donc extrêmement regrettable que les auteurs se soient contentés de déviations aussi faibles, qui ne réalisent aucun progrès sur celles de leurs premières expériences.

En résumé, on peut faire à toutes ces expériences les objections suivantes :

1° L'appareil de mesure se trouve placé dans une région qui est le siège de perturbations de toutes sortes ;

2° Les déviations obtenues sont trop faibles et du même ordre que celles dues à ces perturbations ;

3° Les précautions prises pour s'assurer que la charge du disque est réellement entraînée sont insuffisantes.

Expériences sur l'effet d'induction électromagnétique
de la convection électrique.

J'ai entrepris l'étude expérimentale de la convection électrique en cherchant à me mettre à l'abri des trois objections que je viens de signaler.

Pour pouvoir éloigner les appareils d'observation des appareils d'expériences, j'ai fait agir les effets d'induction des courants de convection.

D'autre part, j'ai cherché à en accroître l'intensité dans une notable proportion.

On sait que, si l'on désigne par σ la densité superficielle électrostatique d'une surface plane de largeur l et de longueur ds se déplaçant dans le sens de ds avec une vitesse v , on réalisera un courant de convection dont l'intensité i serait

$$i = \sigma vl.$$

Pour accroître i , j'ai augmenté la valeur de chacun des facteurs de cette expression, par rapport aux expériences antérieures.

Pour le premier, j'ai opéré avec des disques tournant dans des armatures très rapprochées, ce qui donnait une capacité, et par conséquent une densité superficielle, beaucoup plus forte.

Pour les deux autres, j'ai doublé le diamètre des disques, tout en maintenant une vitesse du même ordre de grandeur.

J'ai pu ainsi avoir des effets calculés bien supérieurs à ceux dus aux perturbations.

Dans les procédés expérimentaux, j'ai toujours tenu compte, avec le plus grand soin, des conditions d'isolement et d'entraînement. Enfin, j'ai toujours introduit, dans tous les dispositifs, une spire témoin qui permettait, sans

rien changer aux phases des expériences, de comparer aux effets de la convection ceux d'une conduction équivalente.

Principe de l'expérience. — Le principe de l'expérience est le suivant : Créer brusquement un courant de convection et observer son effet sur un circuit induit voisin.

Je n'avais pas d'autres données *a priori* que celles pouvant résulter des expériences de M. Rowland.

Aussi j'ai dû tâtonner, au point de vue pratique, au sujet de presque toutes les parties de mon appareil. Celui-ci a donc subi des modifications sans nombre.

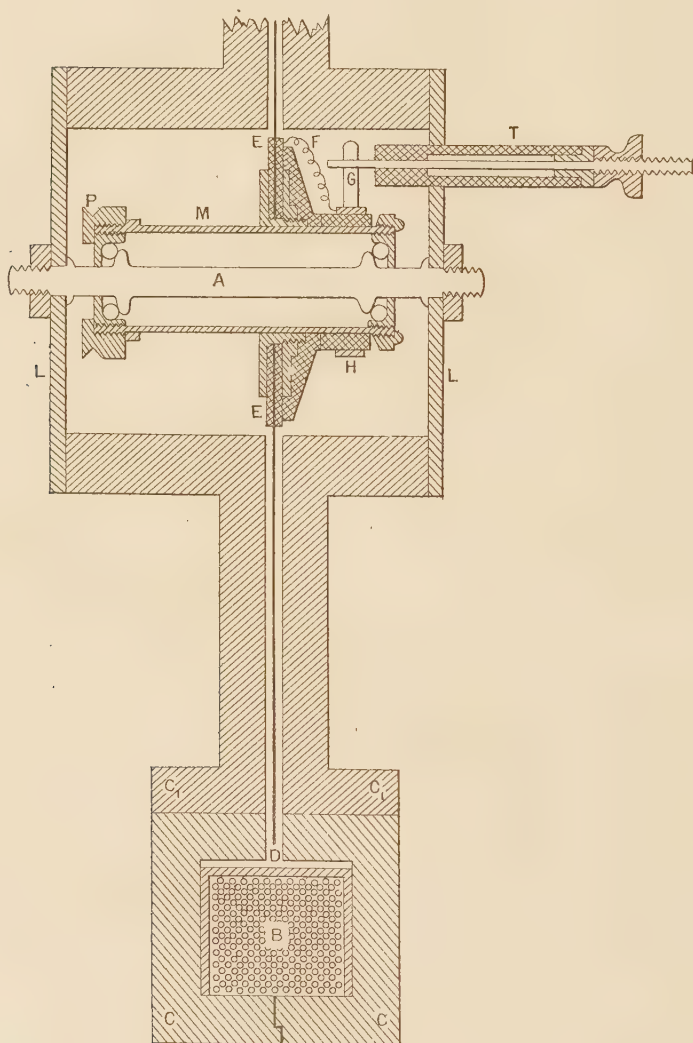
Je ne puis songer à les décrire ici. Elles occuperaient une place considérable et la plupart n'ont aucune portée pratique.

Tous ceux qui ont fait des recherches physiques exigeant des constructions mécaniques un peu importantes savent ce qu'il en est. Bien souvent on est arrêté pendant des semaines, faute de documents, par des difficultés qu'on ne soupçonnait même pas et qui, une fois résolues, n'apparaissent plus que comme des enfantillages ou comme le résultat de simples oublis. On fait modifier complètement une pièce en lui attribuant la cause d'un insuccès, et, la pièce refaite, on s'aperçoit que l'insuccès était dû à une vis mal placée, à un mauvais contact électrique, à mille petites choses insignifiantes, si insignifiantes qu'on n'avait pas eu l'idée qu'elles pussent apporter de telles perturbations. Le récit de pareils tâtonnements étant tout à fait inutile, je me contenterai de décrire avec détail l'appareil définitif que j'ai construit, en signalant simplement en quelques mots les modifications que chaque partie a pu subir.

Appareil définitif. — Voici d'abord une description sommaire de l'appareil définitif et de l'expérience, description destinée à rendre plus clairs les détails donnés ensuite sur chaque partie de l'appareil :

Un disque D, de 0^m,37 de diamètre (*fig. 9*), solidaire

Fig. 9.



d'un moyeu M monté sur billes d'acier, peut tourner autour d'un axe fixe A. Le disque est isolé du moyeu à

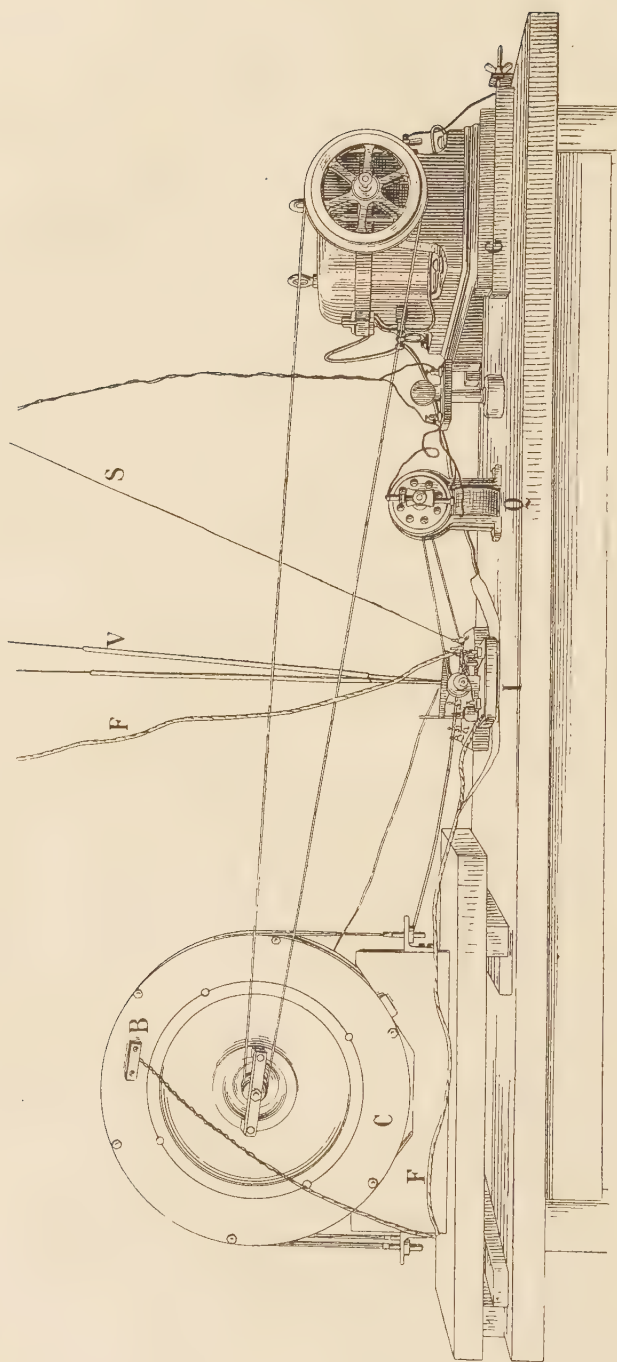
l'aide de pièces d'ébonite E. On le charge par l'intermédiaire du fil F, de la bague métallique isolée H et du balai G. L'axe A est fixé par deux lames d'acier L au centre de deux couronnes de fonte CC, CC, laissant, entre elles un intervalle de 8^{mm} au milieu duquel tourne le disque. Les couronnes, reliées au sol, forment donc un condensateur dont le disque est l'armature interne. En même temps, ces couronnes de fonte constituent un circuit magnétique autour d'une bobine B concentrique au disque. Cette bobine porte 13 000 tours de fil de cuivre de 0^{mm}, 15 de diamètre: ses extrémités sont reliées aux bornes d'un galvanomètre très sensible. Le mouvement est communiqué au disque par l'intermédiaire d'une courroie agissant sur la poulie P. La *fig.* 10 montre l'ensemble des appareils.

D'après la théorie précédemment rappelée, si l'on fait tourner le disque très rapidement, puis qu'on le charge, le courant de convection ainsi créé induira un courant dans la bobine B. Pour rendre cet effet plus facile à observer, un commutateur produit plusieurs fois par seconde la charge et la décharge du disque et, en même temps, permet de n'envoyer dans le galvanomètre que les effets dus soit à la charge, soit à la décharge. On doit ainsi observer, au lieu d'une impulsion, une déviation permanente. Si l'on vient à rendre la charge égale et de signe contraire, on observera une déviation en sens inverse et double de la première.

Une spire témoin, fixée dans l'appareil, permet de faire agir sur la bobine B, par le simple jeu d'un inverseur, un courant de conduction interrompu par le même commutateur que celui qui charge le disque. On peut ainsi comparer à chaque instant l'effet d'induction du disque tournant à celui d'un courant de conduction d'intensité égale à celle calculée pour le courant de convection.

Le disque tournant et l'axe. — Je m'étais fixé *a priori*

Fig. 10.



pour le disque un diamètre de 40^{cm}, que j'ai réduit ensuite à 37^{cm}. Je voulais, de plus, atteindre de 100 à 120 tours par seconde, ce qui correspondait à des vitesses périphériques de près de 150^m tout à fait inusitées dans l'industrie.

Je n'ai pu trouver à ce sujet aucun renseignement, d'autant plus que, obligé de rechercher la légèreté, je n'avais guère de choix pour faire mes disques en dehors de l'aluminium pour les métaux, du carton et de l'ébonite pour les diélectriques.

Pour l'axe il en était de même. Toutefois j'ai rejeté *a priori* un montage entre pointes, à cause de l'usure excessivement rapide de pareils systèmes, usure d'autant plus grande que le système est plus lourd.

J'ai donc adopté de suite un axe monté sur coussinets. Comme on trouve couramment dans l'industrie des moyeux de bicyclettes montés sur billes, j'ai songé à monter un disque sur un système de ce genre.

Pour le premier essai, j'avais fixé le moyeu sur un palier très stable; le disque était assujéti à une extrémité de l'axe, dont l'autre extrémité portait une poulie. L'appareil fonctionnait ainsi à l'inverse de son fonctionnement normal. Dans les bicyclettes, en effet, l'axe est fixé aux fourches et c'est le moyeu qui tourne. De plus, les coussinets à billes demandent toujours un certain jeu et, comme le disque était à un bout et la poulie à l'autre, avec les deux coussinets entre, l'axe, au lieu de tourner sur lui-même, décrivait un véritable cône; il en résultait une usure très rapide des billes et de leurs cuvettes, en même temps que des trépidations auxquelles aucune vis ni écrou ne pouvait résister.

J'ai dû adopter le système inverse, fixer l'axe et faire tourner le moyeu. J'ai pris un moyeu de roue arrière de bicyclette qui porte l'engrenage où vient tirer la chaîne motrice. Le moyeu M (*fig. 9*) a été tourné de façon à le

débarrasser des couronnes où viennent se fixer les têtes des rayons.

On a ensuite chaussé à force et soudé un tube de laiton sur lequel était fixée une joue assez épaisse de même matière. Cette joue a été tournée de façon à présenter un épaulement de 75^{mm} de diamètre extérieur, de 41^{mm} de diamètre intérieur, épaulement dont le plan était bien perpendiculaire à l'axe du moyeu. Un pas de vis a été taillé sur la même joue; un écrou soigneusement tourné permettait de serrer le disque contre l'épaulement ainsi préparé. La face de cet écrou a été tournée sur le moyeu en même temps que les autres pièces, de façon à être tout à fait sûr que le serrage se produisait entre deux surfaces bien parallèles, ce qui est une condition essentielle de résistance à la rotation. Tous ces détails sont montrés sur la *fig. 9*.

L'engrenage de commande du moyeu a été remplacé par une poulie en ébonite de 40^{mm} de diamètre extérieur, qui se vissait à force et qu'on arrêtait ensuite par une vis latérale de serrage.

J'ai pris à dessein de l'ébonite, les courroies glissant toujours beaucoup sur les poulies métalliques de petit diamètre et la résine n'ayant pas de prise sur elles. Au contraire, avec des cordes à boyaux bien frottées de résine, j'étais arrivé, sur une poulie d'ébonite, à obtenir un entraînement presque parfait, même pour des vitesses de 125 tours par seconde.

L'axe A du moyeu est fixé entre deux épaulements visés et deux écrous, au centre du reste de l'appareil.

Pour la substance du disque il m'a fallu aussi de nombreux essais. La forme de mon appareil m'obligeait à prendre des disques minces. J'ai d'abord essayé des disques d'ébonite de 1^{mm} ou $1^{\text{mm}}, 5$ d'épaisseur. Ces disques devenaient concaves après une rotation de quelques minutes. Cela tient à ce que, imparfaitement élastiques, leur périphérie prenait pendant la rotation un allongement centri-

fuge plus grand que la partie centrale. De plus, ils s'échauffaient par suite du frottement de l'air en couches minces. Une fois arrêtés ils ne reprenaient pas leur position première et s'emboutissaient en quelque sorte.

Ce n'est qu'avec une épaisseur de 2^{mm} que j'ai obtenu des disques d'ébonite ne s'emboutissant pas par la rotation. Ils n'étaient pas très plans au repos; mais dès qu'ils tournaient un peu vite, la force centrifuge les centrait et ils étaient alors rigoureusement plans.

J'ai aussi essayé des disques très minces en papier du Japon, mais ils se gondolaient encore plus que l'ébonite.

Pour l'aluminium qui m'a servi plus souvent que l'ébonite, j'ai employé pendant assez longtemps un disque de $\frac{5}{10}$ de millimètre d'épaisseur. Ce disque s'emboutissait, mais j'avais la ressource de le faire redresser et je m'en suis servi pour toute une partie de mes déterminations.

J'ai ensuite fait un disque de 1^{mm} d'épaisseur qui restait parfaitement plan et m'a servi pour d'autres essais.

Isolement du disque. — Les disques en aluminium étaient percés au centre d'un trou de 46^{mm} . Sur cette ouverture s'emboîtait l'épaulement d'une rondelle d'ébonite E de 90^{mm} de diamètre, percée d'un trou de 41^{mm} qui s'emboîtait sur le moyeu. Une seconde rondelle d'ébonite de même diamètre extérieur venait s'appliquer de l'autre côté du disque. Cette application se faisait à chaud et, pour éviter qu'une étincelle vint jaillir à travers la jointure, celle-ci était ensuite complètement fermée avec de la gutta-percha.

Les rondelles d'ébonite avaient été très soigneusement passées au papier de verre, puis lavées à l'eau distillée et ensuite au pétrole paraffiné. Cette opération était renouvelée à chaque démontage.

L'épaisseur de ces rondelles était $1^{\text{mm}}, 5$. Malgré cela, elles ont été percées plusieurs fois par l'étincelle jaillissant entre les disques et les écrous de serrage qui étaient au

sol. J'ai dû doubler ces écrous d'une rondelle de mica de $\frac{1}{10}$ de millimètre d'épaisseur, ce qui évita le retour de pareils accidents.

Une des rondelles d'ébonite portait, tout près de sa périphérie, un petit plot de cuivre à épaulement, qu'elle serrait contre le disque, et dont l'autre extrémité était sondée à un fil F.

Le disque ainsi isolé était fixé sur le moyeu M; on reliait alors le fil F à une bague de laiton montée sur le moyeu, dont elle est isolée par une bague d'ébonite de 3^{mm} d'épaisseur et de 25^{mm} de largeur.

Cette bague d'ébonite avait été préparée avec les mêmes soins que les rondelles.

Mais pendant la rotation le fil F venait assez près de l'écrou de serrage pour que l'étincelle éclatât. Il a donc fallu enchâsser cet écrou dans une autre pièce d'ébonite, doublée de mica.

Après avoir monté le disque sur l'axe, on mettait la pièce de protection de l'écrou, puis la bague d'ébonite qui venait butter contre la précédente. Enfin le tout était maintenu par l'écrou de serrage du coussinet à bille du moyeu. Sur la *fig. 9* toutes les pièces d'ébonite sont ombrées en quadrillé.

Lorsqu'on se servait du disque d'ébonite doré, on le montait directement sur le moyeu. Ce disque est doré à partir d'un diamètre de 10^{cm} et jusqu'à sa périphérie. Il y a donc 12^{mm},5 entre la dorure et les écrous. Le centre du disque était d'ailleurs nettoyé avec tous les soins indiqués. Pour s'assurer de l'efficacité de ces soins, on vérifiait au commencement et à la fin de chaque expérience que chacune des pièces métalliques gardait isolément la charge. On se servait pour cela d'un électroscope à deux feuilles d'or très sensible.

On a toujours opéré avec des appareils qui, au bout de cinq minutes, n'accusaient aucune perte appréciable à

l'électroscope. Celui-ci portait une graduation angulaire permettant d'apprécier des variations de 50 volts.

Toutes les fois qu'une perte était accusée, on démontait tout l'appareil et toutes les pièces étaient à nouveau nettoyées comme il a été dit.

Dynamomotrice du disque. — Le moteur du disque, qu'on voit en G (*fig. 10*), est une dynamo compound ⁽¹⁾ à circuit magnétique primaire fermé, de telle sorte que les actions extérieures dues au champ de ce circuit sont très diminuées.

Cette dynamo fonctionne normalement sous 80 volts et peut supporter 15 ampères. Elle fait à vide 1700 tours; ce nombre est, d'ailleurs, remarquablement constant.

J'avais monté sur l'axe de cette dynamo deux poulies de fonte, l'une de 20^{cm} de diamètre, l'autre de 16^{cm}. La gorge de ces poulies est creusée en angle de 60° comme celle de la poulie d'ébonite. C'est le meilleur angle pour un bon entraînement.

J'avais d'abord essayé, comme transmission, d'employer du cuir. Mais j'ai dû y renoncer, cette matière s'allongeant indéfiniment jusqu'à casser, et aucun réglage n'était possible. J'ai employé alors des cordes à boyaux. Celles-ci ne s'allongent pas, ou peu, mais elles s'effilochent très vite, surtout quand on les croise, et j'étais obligé de le faire pour augmenter l'enveloppement des poulies. Toutefois on y remédie en les frottant de temps en temps avec des gousses d'ail, ce qui les agglutine suffisamment.

Il faut, d'ailleurs, des cordes d'un seul morceau, aucun crochet ne pouvant résister à des vitesses un peu considérables.

Trois de ces cordes ont, cependant, suffi pour toutes

(¹) Cette dynamo, du système Limb, m'a été prêtée très complaisamment par la maison Gindre, de Lyon.

mes expériences. En les tenant soigneusement couvertes de résine, j'avais un excellent entraînement.

Lorsque le disque était entraîné par la dynamo, celle-ci faisait 1200 à 1500 tours et consommait 7 à 9 ampères sous 80 volts. La puissance était donc de 560 à 720 watts, c'est-à-dire toujours inférieure à un cheval-vapeur.

Le circuit secondaire; bobine et armature. — Le disque tournant une fois réalisé, il fallait mettre en évidence l'effet d'induction dû à sa charge.

Les courants de convection réalisables étant de l'ordre de $\frac{1}{5000}$ d'ampère, il fallait construire une bobine au centre de laquelle tournerait le disque, et telle que le coefficient d'induction mutuelle des deux fût assez grand pour donner un effet observable au galvanomètre.

Aucune formule simple ne permet d'aborder un calcul de ce genre, et j'ai dû procéder par tâtonnements.

Pour cela, j'ai pris un disque d'ébonite de 37^{cm} de diamètre sur lequel j'ai cousu un fil de cuivre rouge de 0^{mm}, 5 de diamètre, formant une spire circulaire de 32^{cm} de diamètre, concentrique au disque. Cette valeur du diamètre est celle qui correspond à la région moyenne de la partie utile du disque tournant, ainsi qu'on le verra plus loin. J'ai ensuite enroulé sur des cylindres de carton de 39^{cm} de diamètre intérieur et de 4^{cm} de hauteur, 200 tours d'un fil de cuivre isolé à la soie et de $\frac{15}{100}$ de millimètre de diamètre. Le disque d'ébonite était placé concentriquement à cette bobine.

J'ai cherché par tâtonnements quelle intensité il fallait donner au courant envoyé dans la spire roulée sur le disque pour avoir, à la rupture ou à la fermeture, une déviation appréciable à un galvanomètre très sensible relié au fil de la bobine.

J'ai été arrêté immédiatement par une difficulté nouvelle. L'effet était absolument irrégulier et dépendait de la façon dont on rompait le circuit.

J'ai alors employé l'interrupteur qui m'avait réussi pour mes premières expériences (*fig.* 5, p. 13) en le montant de façon à ajouter sur l'aiguille du galvanomètre les effets dus à plusieurs ruptures produites automatiquement sur le circuit primaire. La fermeture de ce circuit se produisait lorsque le circuit du galvanomètre était ouvert et n'avait pas d'effet.

Cette disposition a eu, de plus, l'avantage de transformer l'impulsion en une déviation permanente.

Je suis arrivé ainsi à trouver qu'il faudrait près d'un million de tours de fil pour avoir une sensibilité suffisante. Mais, en mettant une armature de fer, on pouvait réduire considérablement ce nombre.

Les constantes magnétiques du fer pour les champs très faibles sont très mal connues. En admettant pour la valeur de la perméabilité magnétique le nombre 100, j'ai calculé qu'une bobine portant environ 10 000 tours de fil pourrait suffire.

J'ai construit une armature en bois, qui a les dimensions suivantes :

Largeur extérieure.....	50 ^{mm}
Épaisseur extérieure.....	45
Diamètre intérieur.....	390
Largeur de la gorge.....	48
Profondeur.....	42

Sur ce noyau, j'ai enroulé 5^{kg}, 678 de fil de cuivre rouge de $\frac{45}{100}$ de millimètre de diamètre, isolé à la soie.

Ce fil formait exactement 13 800 tours, nombre que j'ai mesuré en rendant l'axe du tour, où a été enroulé le fil, solidaire d'un compteur pendant toute l'opération, qui a demandé dix jours.

Le fil avait été livré en cinq bobines différentes et, dans la longueur de chacune de ces portions, plusieurs épisures simples avaient été faites à la fabrication.

J'ai refait toutes ces soudures à l'étain en employant

exclusivement de la résine et du vernis gomme-laque pour décaper. Les soudures une fois faites étaient entourées de fil de soie, puis vernies à la gomme-laque et l'on attendait que le vernis fût sec pour continuer l'enroulement.

Les deux extrémités du fil ont été soudées à deux vis fixées dans le noyau, le long du cercle intérieur, et dont les têtes, enchâssées dans le bois, sont vissées de façon à affleurer exactement le plan de la joue de la bobine.

Les constantes de la bobine sont donc les suivantes :

Diamètre moyen.....	44 ^{cm}
Longueur.....	5 ^{cm}
Largeur.....	4 ^{cm}
Nombre de tours.....	13800
Résistance à 0°.....	8790 ohms
Coefficient de self-induction dans l'air.	130 × 10 ^{9cm}

L'armature. — Je fis d'abord une armature en fonte *cc* (*fig. 9*) qui avait la forme d'un tore à section rectangulaire dans lequel se logeait la bobine B et qu'on fermait à l'aide de six écrous. Chaque moitié de ce tore était maintenue verticale sur un socle de bois qu'on peut voir *fig. 10*.

Vers l'intérieur, ce tore présentait une fente de 8^{mm} de largeur et de 3^{cm} de profondeur. Le bord du disque tournait dans cette fente. L'axe était fixé sur deux paliers indépendants.

Dans ces conditions, la capacité du disque dont l'effet de convection pouvait être utilisée se réduisait à une couronne de 3^{cm} de large. J'en avais augmenté la capacité en garnissant de verre de 2^{mm} d'épaisseur les parois de la fente qui étaient maintenues au sol.

Pour étalonner l'appareil, j'ai cousu sur un disque d'ébonite de 37^{cm} de diamètre une spire de fil de cuivre de 34^{cm} de diamètre, égal par conséquent au diamètre moyen de la couronne comprise dans la fente du noyau magné-

tique. Ce disque a été mis à la place du disque métallique.

En produisant dans la spire, par l'intermédiaire de l'interrupteur déjà décrit, la rupture d'un courant d'intensité variant de $\frac{1}{10000}$ à $\frac{1}{1000}$ d'ampère, j'ai pu, par un calcul dont on verra plus loin les détails, étalonner l'appareil par rapport au galvanomètre relié à la bobine B.

Connaissant d'autre part la densité superficielle sur le disque tournant et sa vitesse, je connaissais le courant de convection qui devait être réalisé et, par conséquent, la déviation à obtenir au galvanomètre d'après l'étalonnage précédent.

La déviation que je pouvais obtenir avec ces premières dispositions expérimentales était au maximum de 7^{mm} à partir du zéro, en donnant à la charge du disque le signe + par exemple, et cette déviation devait être de 14^{mm} en sens inverse de la première si l'on renversait le sens de la charge.

Je n'obtins aucune déviation, mais, comme on le verra plus loin, le galvanomètre, très sensible, a des variations du zéro assez irrégulières et pouvant atteindre 5^{mm} . La déviation attendue étant du même ordre, ces premières expériences ne réalisaient pas un progrès sur celles de M. Rowland; d'ailleurs, pour qu'une expérience négative soit valable contre une expérience positive déjà faite, il faut qu'elle présente un degré de certitude beaucoup plus considérable.

Je me décidai alors à modifier mon appareil de façon à accroître l'effet cherché.

Pour cela, je fis faire deux nouvelles couronnes $C_1 C_2$ qui s'emboîtaient dans les premières et présentaient au centre une ouverture de 10^{cm} de diamètre (*fig. 9*).

Les couronnes $C_1 C_2$ sont fixées aux couronnes CC chacune par quatre très fortes vis. Le tout a été tourné ensemble de façon que la face interne fût bien plane.

Une fois assemblées, on a ainsi autour de la bobine B un noyau magnétique présentant une fente de 8^{mm} de largeur dans laquelle viendra tourner le disque. La partie de celui-ci utilisée pour l'effet de convection se trouvera cette fois portée à son maximum. On verra même plus loin que la couronne réellement utile s'arrête à un diamètre intérieur de 17^{cm} environ.

Cette nouvelle disposition me permit en outre une grande simplification de l'appareil complet. Je fis en effet fondre et tourner les couronnes C₁ C₂ de façon que l'axe A pût se fixer directement sur elles à l'aide de deux lames d'acier LL de 2^{cm} de large et 5^{mm} d'épaisseur.

Deux ouvertures convenablement disposées et qu'on peut voir *fig. 10* permettent le passage de la courroie de transmission.

Cette disposition, outre qu'elle réduit considérablement les dimensions de l'appareil par la suppression des paliers qui soutenaient l'axe, dispense d'un réglage très pénible, qu'il fallait faire à chaque démontage.

Avec les paliers indépendants, il était très long, en effet, d'obtenir le parallélisme du disque tournant et des parois de la fente.

Avec la nouvelle disposition, au contraire, ce réglage se trouve réalisé automatiquement. De plus, en réglant sur l'axe la position des épaulements de serrage, on peut amener le disque au milieu de la fente, à $\frac{1}{40}$ de millimètre près.

L'interrupteur. — J'ai employé, ainsi que je l'ai dit, une méthode de multiplication pour transformer en une déviation permanente l'impulsion produite.

L'interrupteur était exactement le même qui m'a servi pour mes premières expériences (*voir p. 25, fig. 6*).

Le balancier B₂ servait ici à interrompre périodiquement et pendant une durée $\frac{T}{2}$ le circuit du galvanomètre.

Sa forme se prête particulièrement bien à l'interruption d'un circuit où se trouve un galvanomètre très sensible. En effet, le contact se produit sans aucun frottement entre deux pièces de platine qu'on a soin de décaper ou de remplacer assez souvent, et aucune force électromotrice ne peut prendre naissance de ce chef. Avec un rhéotome tournant, à contact laiton sur laiton interrompu par de l'ébonite, dont je me suis servi quelque temps, il se produisait des déviations considérables dues à la chaleur développée par frottement entre deux surfaces qui n'étaient très vite plus du tout homogènes, quelque soin qu'on eût pris pour les préparer.

Les pièces de platine entre lesquelles le contact a lieu sont soudées à l'étain sur des pièces de laiton.

Il fallait faire ces soudures avec un soin tout particulier, se servir exclusivement de résine pour décaper le fer et d'une solution de gomme-laque dans l'alcool comme fondant. Toute trace de substance acide dans la soudure donne naissance à des forces électromotrices qui se traduisent par des déviations de plusieurs centimètres.

J'employais pour ces soudures un fer spécial ne servant qu'à cet usage. J'ai pris un jour, sans m'en apercevoir, un autre fer qui avait été décapé au sel ammoniac. Quoique j'eusse fait la soudure à la résine et à la gomme-laque, il restait assez d'acide provenant des soudures précédentes.

L'appareil remonté, j'observais des déviations de 12^{cm} dans un sens, puis de 10^{cm} dans le même sens, alors que j'attendais 2^{cm} environ de chaque côté du zéro, en inversant le phénomène (étalonnage de l'appareil). Comme je ne me doutais pas de l'erreur commise sur le fer à souder, j'ai cherché ailleurs la cause de cette perturbation et cette recherche m'a fait perdre plusieurs jours. J'étais en effet obligé de procéder par éliminations successives entre les différentes parties de mon appareil et il en a beaucoup. Ce n'est que tout à fait à bout d'essais infructueux que je

pensai à la soudure, et il me fallut la refaire deux fois et changer complètement le morceau de platine.

Je cite cet incident moins à cause de son importance absolue que comme exemple de l'ordre de difficultés qu'on rencontre lorsqu'on opère avec des appareils de mesure dont la sensibilité est poussée à son maximum et en présence d'appareils d'expérience dans lesquels des moyens mécaniques ou électriques puissants sont mis en jeu.

Le galvanomètre. — Je me suis servi d'un galvanomètre Thomson à deux paires de bobines, construit par la maison Carpentier. Cet appareil, qui doit dater de quelques années, avait longtemps séjourné dans une armoire. L'aimant directeur s'était par suite presque complètement désaimanté. Il fallait l'abaisser assez près de l'aiguille supérieure du système astatique pour que celle-ci commençât à obéir. Il en résultait que le couple directeur très faible se produisait cependant dans un champ moins irrégulier que celui produit par un aimant directeur puissant placé très loin des aiguilles. C'est en partie à cette condition purement fortuite que j'attribue la sensibilité considérable de l'appareil.

Ses constantes étaient les suivantes:

Résistance à 0°.....	4207 ohms
Longueur focale du miroir.....	3 ^m ,50

Le spot se formait sur une règle graduée en millimètres au-dessus de laquelle se trouve un bec de gaz. Celui-ci brûle dans un tuyau en fer dans lequel on a pratiqué une ouverture carrée, traversée par un petit fil métallique. Malgré la grande distance focale du miroir, l'image de ce fil était très suffisamment nette.

Le système astatique est formé par deux aimants horizontaux orientés en sens inverses, et suspendus par un fil de cocon de 25^{mm} de longueur.

La période d'oscillation variait, avec la sensibilité, de neuf à vingt secondes.

L'appareil reposait sur une table placée sur un monolithe fondé dans les caves de la Sorbonne. Cette disposition, qui le met à l'abri des trépidations dues aux mouvements produits dans son voisinage immédiat, ne supprimait pas l'effet des voitures et tramways qui circulent continuellement sur le boulevard Saint-Michel.

Aussi l'aiguille accusait fréquemment un tremblement dans le plan vertical, bientôt suivi de déviations qui atteignaient parfois plusieurs centimètres. Mais le tremblement du spot était bien caractéristique de ces déviations et permettait de les différencier très nettement de celles dues aux effets à mesurer.

Pour protéger autant que possible l'appareil des variations magnétiques étrangères, je l'ai enfermé dans une boîte ayant la forme d'un prisme droit triangulaire à base équilatérale, fait en tôle de fer de 7^{mm} d'épaisseur; cette boîte se ferme par le haut à l'aide d'un double couvercle de fer.

L'aimant directeur est contenu à l'intérieur de cet écran électromagnétique.

Cette précaution réduisit beaucoup les déviations perturbatrices observées au début; mais elle ne suffit pas à les supprimer. En particulier, un ventilateur électrique et une bobine d'induction fonctionnaient très souvent dans une salle située au-dessus de la mienne; le premier donnait lors de sa mise en marche une impulsion de 4^{cm}, qui se réduisait ensuite à une déviation permanente de 12^{mm}. Quant au second de ces appareils, son fonctionnement me rendait tout travail impossible, l'aiguille se promenant d'un bout à l'autre de l'échelle.

Les deux dynamos dont je me servais avaient heureusement moins d'influence. Elles étaient placées à 6^m du galvanomètre. La petite, qui commande l'interrupteur, ne

produit aucune déviation permanente. Elle donne seulement une impulsion, si le circuit du galvanomètre est fermé, au moment de sa mise en marche ou de son arrêt; cette impulsion est due non à une action directe du champ de la bobine sur les aiguilles aimantées du galvanomètre, mais à une induction de ce champ dans la partie du circuit du galvanomètre qui est interrompue par l'interrupteur et qui se trouve forcément assez près de cette dynamo.

Mais après cette impulsion, qu'on pouvait d'ailleurs éviter en réglant à la main la position de l'interrupteur au moment de la mise en marche, le spot revenait toujours à sa première position.

Avec la dynamo motrice du disque il n'en était pas ainsi. Quoique le noyau de cette dynamo soit presque entièrement fermé sur lui-même (système Limb), le champ créé à l'extérieur suffisait pour donner au galvanomètre une déviation permanente de 60 à 100 divisions, suivant la position de l'aimant directeur par rapport au système astatique. On verra plus bas ce que ceci veut dire.

Mais la déviation était tout à fait stable, aussi stable du reste que le champ de la dynamo elle-même. Et celle-ci, montée avec trois circuits compensateurs, ne présentait pas de variations de plus de 20 tours pour des intervalles de dix minutes, durée d'une expérience. Comme la vitesse par minute était de 1200 à 1500 tours, cela fait une variation maximum de $\frac{1}{60}$.

D'ailleurs, les chiffres qu'on trouvera plus bas montrent suffisamment que les variations étaient sans influence sur le galvanomètre.

Sensibilité. — La sensibilité du galvanomètre pour une même distance de l'aiguille à l'aimant directeur était assez variable, mais elle a toujours été en augmentant depuis le commencement de mes expériences.

Au début, huit jours environ après que le galvanomètre était dans son écran magnétique, j'avais eu les résultats

suivants :

Intensité envoyée.	Shunt.	Déviation.
1 daniell sur 500 000 ohms...	$\frac{1}{100}$	89 ^{mm}
»	... $\frac{1}{1000}$	9 ^{mm}

Sensibilité ramenée à zéro d'après la formule de Kohlbrausch :

$$e_0 = 4,9 \times 10^7.$$

Six mois après, au moment où j'ai étalonné l'appareil, j'ai mesuré à nouveau cette sensibilité. J'ai trouvé :

Intensité envoyée.	Shunt.	Déviation.
1 daniell sur 500 000 ohms...	$\frac{1}{100}$	208 ^{mm}
«	... $\frac{1}{1000}$	20 ^{mm}

Sensibilité :

$$e_0 = 11,5 \times 10^7.$$

La sensibilité avait donc presque triplé.

Ce résultat n'a rien d'étonnant. Il est dû à l'aimantation que prennent peu à peu les parois de l'écran magnétique sous l'influence du champ terrestre d'une part, et de l'aimant directeur de l'autre.

L'écran se comporte au bout de peu de temps, comme un aimant directeur de pôles inverses du premier, agissant par conséquent pour diminuer le champ de celui-ci.

Ce qui me l'a prouvé d'une manière certaine, c'est que, si l'on venait à faire varier la position du couvercle de l'écran magnétique, l'aiguille changeait de position d'équilibre, et sa sensibilité diminuait.

J'ai dû repérer très soigneusement le couvercle et la boîte pour être sûr de mettre toujours celui-ci dans le même sens.

Dans un appareil aussi sensible on ne peut pas s'attendre à avoir un zéro stable. De fait, dans l'espace de quelques heures, le spot sortait toujours de l'échelle et il

fallait l'y ramener en tournant légèrement l'aimant directeur. La déviation lente ainsi produite avait lieu tantôt à droite, tantôt, à gauche.

Ceci explique comment la position relative de l'aimant directeur par rapport aux aiguilles est très variable.

On sait en effet que le champ dans lequel les aiguilles oscillent a une orientation variable et l'on comprend comment le champ de la dynamo motrice du disque peut donner lieu à une déviation permanente de valeur différente suivant l'orientation de l'aimant directeur.

Malgré toutes ces causes d'erreur, l'appareil se comportait assez bien. Je l'ai longuement étudié et je donne ci-dessous deux Tableaux de lectures faites à l'échelle, de dix secondes en dix secondes. J'ai choisi un Tableau correspondant à une période de stabilité presque complète, et un Tableau correspondant à une période assez agitée,

LECTURES FAITES AU GALVANOMÈTRE DE DIX SECONDES
EN DIX SECONDES, AUCUN APPAREIL NE FONCTIONNANT AU VOISINAGE.

Première série.

167,0	163,5	162,5	162,0	164,0	162,5
165,0	162,5	163,0	162,0	161,5	162,5
165,5	163,0	165,0	162,5	161,5	161,0
166,0	162,5	165,5	163,5	161,0	162,0
166,0	162,0	162,5	164,5	162,5	160,5
166,0	161,5	162,5	164,5	163,0	162,5
					160,5

Durée totale : six minutes.

Écart maximum : 6^{mm}, 5.

Saut brusque maximum : 3^{mm}, 5.

Seconde Série

339	344	333	329	327
340	341	333	328	327
342	335	331	326	323

Durée totale : deux minutes vingt secondes.

Écart maximum : 21^{mm}.

Saut brusque maximum : 4^{mm}.

Cette série est, du reste, une des plus mauvaises. Je la cite exprès pour montrer que, si le déplacement dans un même sens peut devenir assez rapide, les sauts brusques et les retours en arrière n'atteignent jamais cinq divisions.

Comme, dans toutes mes expériences, je me suis toujours astreint à observer le galvanomètre pendant les durées égales de chaque phase de l'expérience, on se rend compte de suite, en observant les chiffres relatifs à chacune des phases, de ce qui appartient aux déviations habituelles du galvanomètre et de ce qui est dû aux expériences elles-mêmes.

Du reste, j'ai fait 49 expériences complètes.

Dans le nombre, 22 ont été faites en notant une seule fois la position du spot du galvanomètre pour chacune des phases successives de l'expérience; 27 ont été faites en lisant sans interruption la position du spot toutes les dix minutes et marquant simplement dans les colonnes de chiffres ainsi formées, le moment correspondant à chaque phase.

Or, les différences entre les moyennes données par cette seconde méthode sont du même ordre que celles données par la première.

Enfin, pour tâcher de supprimer entièrement les perturbations propres à ce galvanomètre, j'ai essayé, sur le conseil de M. Lippmann, de le remplacer par un Desprez-d'Arsonval qui, par construction, n'aurait pas présenté les mêmes variations.

J'ai pris un Desprez-d'Arsonval qui donnait, à 1^m, 22 divisions pour $\frac{1}{1000000}$ d'ampère.

Il fallait, pour arriver à une sensibilité du même ordre que celle du Thomson, multiplier cette sensibilité par vingt.

Pour y arriver, j'ai, sur les indications de M. Lippmann, supprimé les fils métalliques qui supportent le cadre du galvanomètre et y amènent le courant. Un mor-

ceau de 10^{mm} de long a été seulement laissé. Le cadre a été ensuite suspendu à l'aide d'un fil de cocon qui s'attachait au morceau de fil de platine supérieur. Aucun fil n'a été attaché au platine inférieur. Pour faire arriver le courant, on a disposé sur deux tiges de laiton deux petits étendards formés par une feuille d'or, qui venaient frotter contre les fils de platine. Comme le contact n'était pas très bon et cessait quelquefois brusquement, j'ai disposé, en face des feuilles d'or, des fils métalliques de 3^{mm} de diamètre, montés sur de petits blocs de paraffine et reliés par un fil à une pile de charge. En réglant le nombre d'éléments, on attirait la feuille d'or avec la force qu'on voulait, l'obligeant ainsi à appuyer sur le fil de platine sur lequel elle se pliait légèrement.

Mais l'appareil n'était pas encore assez sensible et ne donnait que 8 divisions pour 10⁻⁷ ampère.

De plus, le couple de torsion du fil de cocon ne suffisait pas, quel que soit l'angle de torsion, à amener le cadre dans toutes les positions qu'on voulait.

Ce cadre possède très probablement un couple directeur magnétique propre qui, bien que très faible, est cependant plus fort que celui du fil de cocon et limite la sensibilité de l'appareil.

Les fils qui reliaient le galvanomètre à la bobine induite et à l'interrupteur étaient formés de 3 fils de cuivre de $\frac{2}{10}$ de millimètre, entourés d'une couche de gutta-percha ayant un diamètre extérieur de 5^{mm}. Ils étaient tortillés ensemble et ne présentaient de boucle que sur l'interrupteur. Encore celui-ci avait été disposé de façon à rendre la surface de la boucle très petite. Dans toute la partie voisine de l'interrupteur et, par conséquent, des pôles de la pile de charge, ces fils étaient entourés de papier d'étain reliés au sol, et formant écran électrique.

Disposition générale des appareils. — La fig. 10 montre la disposition des appareils. Ils étaient tous sur une même ligne, les axes des champs des dynamos parallèles à l'axe de rotation du disque, de façon que les lignes de forces magnétiques des deux dynamos ne pussent pas venir traverser l'ouverture des couronnes.

Le disque tournant était placé parallèlement au méridien magnétique. Cette disposition écartait toute idée d'induction dans le disque par le champ terrestre; elle a permis de porter à 6^m la distance entre les dynamos et le galvanomètre; de plus l'axe des dynamos était ainsi oblique par rapport à l'axe des bobines du galvanomètre.

La charge était fournie par une batterie de petits accumulateurs installée au laboratoire de M. Bouty.

Deux fils très soigneusement isolés à la gutta-percha et disposés parallèlement à une distance de 10^{cm} l'un de l'autre sur des supports de porcelaine garnis de tubes de caoutchouc, amenaient les deux pôles de la batterie sur la table portant les appareils. Ces pôles étaient fixés à des godets de mercure noyés dans un bloc de paraffine.

Dans toutes leurs parties voisines du circuit du galvanomètre (la distance minimum étant égale à 25^{cm}), ces deux fils avaient été enfermés dans des tubes de verre paraffinés, enfermés eux-mêmes à l'intérieur de tubes de laiton reliés au sol.

Le fil qui faisait communiquer le balancier de charge avec le disque était protégé de la même façon.

Plusieurs séries ont été faites avec ce simple fil. Mais au moment de la charge oscillante, il arriva plusieurs fois que les pièces isolantes en ébonite, épaisses cependant de 2^{mm}, furent percées par l'étincelle. Je dus les refaire et en dernier lieu je les doublai de feuilles de mica. Mais en même temps je remplaçai le fil par un tube de verre de 2^{mm} de diamètre intérieur, plein d'eau très légèrement acidulée. La résistance de ce tube est de 54000 ohms. Il

était entouré d'un écran électrique constitué par un tube de laiton.

La première fois que j'essayai la charge oscillante du disque au repos, le galvanomètre dévia de 200 divisions environ et, quand je changeai le signe de la charge, le spot se déplaça, en sens inverse, de 400 divisions. J'avais négligé de placer la bobine induite dans un écran électrique complet.

Cette bobine fut alors garnie sur sa face intérieure de deux couches de papier d'étain rabattues sur les joues latérales de façon à venir appuyer contre les couronnes de fonte qui sont toujours au sol.

Cette précaution ne réduisit pas très sensiblement la déviation.

Mais cette déviation restait la même si je supprimais la communication entre le disque et l'interrupteur. Elle était due à des effets d'influence de la moitié de l'interrupteur servant à la charge sur l'autre moitié où se trouve précisément la partie ouverte du circuit du galvanomètre.

En mettant un écran électrique tout autour de cette partie du circuit, la déviation se réduisit à 50 divisions environ. Un second écran formé d'une grande plaque métallique verticale, placée tout contre le palier qui supporte l'axe de l'interrupteur, réduisit encore cette déviation à 20 divisions.

Je mis très longtemps à trouver la cause de ces 20 dernières divisions. En procédant par éliminations successives, je trouvai enfin qu'elles étaient dues en partie à l'influence du fil qui reliait les couronnes de fonte au sol. Je supprimai ce fil et établis le courant des couronnes avec le tube qui servait d'écran au fil reliant le disque à l'interrupteur.

Enfin, une dernière déviation de 7 à 8 divisions se produisait quelquefois lorsque je chargeais le disque au repos et cessait si je faisais tourner le disque tout en continuant

à le charger. D'autres fois, c'était l'inverse qui se produisait. Cet effet était tellement bizarre et irrégulier que je ne pouvais en imaginer la cause. Après de longues recherches, qui paraîtront ridicules après coup, je trouvais ceci :

Les écrans entourant les différentes parties de l'interrupteur étaient simplement posés sur la table ou sur l'interrupteur. Le palier de l'axe de celui-ci se trouvait ainsi au sol ou bien isolé suivant qu'il touchait ou non les écrans. Lorsqu'il était isolé, la charge prise par influence par une extrémité de l'axe agissait, à l'intérieur même des écrans, sur la boucle de circuit du galvanomètre placée en face de l'autre extrémité de l'axe. Les trépidations de la table, causées par la rotation de la dynamo, produisaient ou détruisaient le contact entre des paliers et les écrans.

J'ai alors établi une liaison métallique vissée entre le sol et ces paliers et l'effet a tout à fait disparu.

Les pôles de la pile de charge se trouvaient représentés par deux godets de mercure noyés dans un bloc de paraffine.

Deux autres godets semblables, reliés aux vis à piston du balancier B_1 , étaient disposés en losange avec les premiers. L'un de ces godets était toujours relié au sol. Au moyen d'un contact double en ébonite on mettait un des pôles de la pile au sol, l'autre en relation avec le godet isolé.

Un contact en ébonite pareil au premier, mais avec les tiges métalliques disposées en sens inverse, permettait de renverser le signe de la charge, et ce changement pouvait se faire presque instantanément.

Spire témoin. — Enfin, sur le même bloc de paraffine, se trouvaient disposés deux godets reliés à un accumulateur.

Une spire de fil de cuivre de $\frac{4}{10}$ de millimètre de diamètre était fixée à demeure à l'intérieur des couronnes de

fonte, sur la partie cylindrique formée par l'alvéole où est enclâssée la bobine B.

Cette spire, que j'appellerai *spire témoin*, forme un circuit circulaire de 37^{cm} de diamètre, qui se trouve ainsi presque dans la même position que le disque tournant.

En changeant le sens des contacts de charge sur le bloc de paraffine, on pouvait envoyer dans la spire témoin un courant dont une boîte de résistance interposée réglait l'intensité. Ce courant était interrompu exactement comme la charge et l'on pouvait opérer la substitution sans aucun changement dans la marche des appareils.

En calculant l'intensité attendue pour le courant de convection, on pouvait, l'appareil ayant été étalonné par rapport à la spire témoin, envoyer dans celle-ci un courant d'intensité correspondante et comparer à chaque instant l'effet d'induction d'un courant de convection à celui d'un courant de conduction.

Calcul des déviations attendues. — On sait que l'intensité i du courant de convection produit par une surface de largeur l , de longueur ds se déplaçant dans le sens de ds avec une vitesse v et chargé à une densité superficielle σ serait

$$i = \sigma v l.$$

Soit r le rayon en un point du disque, e l'épaisseur de la couche d'air entre le disque et les plateaux fixes, V le potentiel de charge en unités électromagnétiques C.G.S., n le nombre de tours par seconde; on a

$$\sigma = \frac{V}{4\pi e},$$

$$V = 2\pi r n,$$

$$l = dr,$$

et le courant sera, pour une seule face du disque,

$$(1) \quad i = \frac{Vn}{e} \int_{r_1}^{r_2} r dr,$$

r_1 et r_2 désignant les valeurs extrêmes du rayon entre lesquelles le disque est chargé.

L'intensité du courant est donc facile à calculer.

Mais il n'en est pas de même des effets d'induction de ce courant sur le circuit secondaire.

Pour des circuits de ce genre, l'expression du coefficient d'induction mutuelle est toujours compliquée et les résultats n'en sont qu'approchés.

L'intégration de pareilles fonctions aurait présenté de grandes difficultés.

Aussi, j'ai préféré procéder expérimentalement et demander à l'appareil lui-même une formule empirique capable de donner la valeur de la déviation correspondant à un courant d'intensité connue, circulant à l'intérieur de la fente des couronnes dans une spire de rayon connu.

Étalonnage de l'appareil. — Pour cela, j'ai disposé sur un disque d'ébonite une série de spires de fils de cuivre, concentriques au disque, et de diamètres décroissants depuis 365^{mm} jusqu'à 110^{mm}, considérant *a priori* comme entièrement négligeable l'effet de la partie du disque comprise entre le centre et ce dernier diamètre. Ce disque était disposé à la place du disque tournant.

La méthode consistait à envoyer dans ces spires des courants d'intensité connue au moyen de l'interrupteur et à noter les déviations au galvanomètre.

Pour obtenir ces courants, j'employais comme source un accumulateur portatif ayant déjà servi quelques heures, de façon à avoir une force électromotrice assez constante.

Cette force électromotrice était, d'ailleurs, mesurée par une méthode d'opposition avant et après chaque opération.

Les bornes de l'accumulateur étaient reliées aux bornes d'une boîte de résistance et, successivement, aux extrémités des différentes spires de fil.

La résistance de ces spires était tout à fait négligeable vis-à-vis de celles interposées sur la boîte de résistance.

D'autre part, ces résistances interposées, grandes vis-à-vis de la résistance intérieure de l'accumulateur, étaient du même ordre que celles interposées sur le circuit de l'accumulateur lorsqu'on en mesurait la force électromotrice.

On ne fait donc pas d'erreur appréciable en admettant, pour l'intensité des courants envoyés dans les spires étalons, le quotient de la force électromotrice mesurée par la résistance de la boîte.

Ceci posé, j'ai d'abord cherché pour quel nombre de tours de l'interrupteur l'effet d'induction produit par un même courant envoyé dans une même spire donnait un effet maximum.

J'ai commencé par cinq tours à la seconde jusqu'à vingt-deux. L'effet augmente jusqu'à dix-sept tours, et diminue au delà. En outre, il est plus grand d'un tiers en ajoutant sur le galvanomètre des effets de rupture au lieu de ceux de fermeture.

J'ai donc étalonné l'appareil avec une vitesse de dix-sept tours par seconde et fonctionnant à la rupture.

Lorsque j'ai ensuite opéré avec le disque tournant, j'ai fait varier le nombre de tours et j'ai essayé également l'effet de la charge ou de la décharge du disque. Mais après m'être assuré, par de nombreux essais, que ces variations n'avaient aucune influence sur le résultat cherché, j'ai opéré constamment à la rupture et avec dix-sept tours par seconde à l'interruption.

J'ai fait trois séries d'étalonnages. On trouvera pages 76 et 77 les chiffres relatifs à l'une de ces séries.

Ces chiffres représentent les lectures faites au galvanomètre de dix en dix secondes. Sans se préoccuper de la position du zéro on mettait l'interrupteur en marche, puis, la vitesse normale atteinte, on envoyait le courant dans

un sens à l'aide d'un commutateur bipolaire; quatre lectures étaient alors faites, puis le commutateur inversé et quatre nouvelles lectures faites; enfin, quatre autres lectures étaient encore faites après une seconde inversion. La moyenne de chacune de ces trois séries était prise et la déviation admise est la moyenne des différences entre les séries 1, 2 et 2, 3. On élimine ainsi l'erreur due au déplacement du zéro.

Il y avait six spires dont les rayons avaient les valeurs suivantes :

Spires.	Rayons. mm
1.....	182
2.....	150
3.....	117
4.....	86
5.....	70
6.....	56

Les deux autres séries ont été faites en modifiant les intensités. Voici les déviations moyennes résultant de ces trois séries pour chacune des spires :

Force électromotrice: 2,14 volts.

Spire.	Résistance. ohms	Déviation. mm
1.....	10 000	69
2.....	10 000	21,8
3.....	10 000	6,7
4.....	100	162
5.....	100	62
6.....	100	9

J'ai cherché par tâtonnement si une formule empirique ne pouvait pas relier ces déviations au diamètre des spires correspondantes. Toutes les formules qui s'appliquent bien aux trois premières spires donnent un résultat beaucoup trop faible pour les trois dernières.

On remarquera qu'à partir de la spire 4, les déviations

TABLEAU DE DÉVIATIONS POUR L'ÉTALONNAGE DE L'APPAREIL.

(Force électromotrice : 2 volts, 14.)

NUMÉRO des spires.	100 OHMS.			200 OHMS.			1000 OHMS.			
6	243	246	236	9 ^{mm}	»	»	»	»	»	
	237	247	236		»	»		»	»	»
	237	249	236		»	»		»	»	»
	240	247	239		»	»		»	»	»
	239	246	240		»	»		»	»	»
	—	—	—		»	»		»	»	»
	239	247	237		»	»		»	»	»
5	283	223	280	61 ^{mm} ,5	271	233	263	34 ^{mm} ,5	»	
	283	223	284		269	233	264		»	»
	282	220	282		267	230	263		»	»
	282	219	284		267	230	263		»	»
	—	—	—		—	—	—		»	»
	282,5	221	282,5		268,5	234,5	263,2		»	»
	—	—	—		—	—	—		»	»
4	327	159	315	168 ^{mm} ,3	281	203	281	80 ^{mm} ,4	249	
	330	158	316		281	202	282		249	231
	331	156	321		284	203	284		248	231
	333	154	327		283	202	284		248	230
	—	—	—		283	202	285		248	230
	330	156,7	320		282,4	202	283,5		248,5	230,5
	—	—	—		—	—	—		—	—
				15 ^{mm} ,6					245	
										245
										243
										242
										243,7

2000 OHMS.			4000 OHMS.			10000 OHMS.		
3	210	240	210	238	217	220	220	226
	208	240.	209	235	222	218	220	229
	208	240	208	236	217	217	220	232
	206	240	210	233	223	217	220	232
	—	—	—	—	—	217	220	235
	208	240	209,2	235,5	219,7	218	220	230,8
2	155	263	160	244	190	189	208	214
	150	262	156	244	190	189	209	213
	152	264	153	244	187	188	210	212
	151	265	151	243	187	189	211	212
	—	—	—	—	—	188,7	209,5	—
	152	263,5	155,4	243,7	188,5	188,7	209,5	212,7
1	345	129	330	178	281	294	268	260
	348	124	333	175	283	293	265	260
	349	119	339	173	288	291	267	262
	350	115	341	173	287	290	267	264
	350	111	342	171	288	292	265	263
	—	—	—	—	—	—	—	—
	348,4	119,6	337	174	285,4	292	266,4	261,8
	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—

pour $\frac{1}{5000}$ d'ampère sont plus petites que 2^{mm} . D'autre part, si l'on calcule l'intensité totale du courant de convection qui serait dû à la couronne comprise entre les spires 4 et 6, pour une vitesse de 120 tours par seconde et une charge de 6000 volts, conditions maximum dans lesquelles j'ai opéré, on trouve un nombre très inférieur à $\frac{1}{5000}$ d'ampère.

J'ai donc trouvé légitime de calculer le coefficient de l'appareil en négligeant les chiffres donnés par les trois dernières spires. D'ailleurs, j'ai intégré l'expression (1) (p. 72) à partir d'une limite inférieure justement égale au rayon de la spire 4.

J'ai alors adopté la formule empirique suivante, qui est calquée sur la formule de Neumann :

$$k = \frac{\alpha(b-r)}{i(r^2-a^2)},$$

dans laquelle k est le coefficient cherché, α la déviation donnée par un courant d'intensité i envoyé dans une spire de rayon r , b le rayon moyen de la bobine induite et a la valeur du rayon à partir de laquelle on néglige l'effet; tous ces nombres sont exprimés en unités C.G.S et i en unités électromagnétiques C.G.S.

La valeur moyenne de k , calculée à l'aide de cette formule pour les moyennes fournies par les trois séries, est égale à 48 266 et j'ai adopté la valeur 48 000 pour simplifier les calculs ultérieurs.

Calcul des déviations que devaient donner les courants de convection. — Le coefficient k étant ainsi calculé, si l'on veut connaître la déviation α que donnerait un courant d'intensité i dans une spire de rayon r , on écrira

$$\alpha = \frac{ki(r^2-a^2)}{b-r}.$$

Pour une déviation infiniment petite, on aura

$$d\alpha = di \frac{k(r^2-a^2)}{b-r};$$

si l'on remplace di par sa valeur tirée de l'expression précédemment établie, on a

$$dx = \frac{k \mu n}{V e} \frac{(r^2 - a^2)}{(b - r)} r dr$$

et

$$x = \frac{k \mu n}{V e} \int_a^c \frac{r^2 - a^2}{b - r} r dr,$$

ce qui donne

$$(a^2 b - b^3) \log \frac{b - c}{b - a} - (a^2 - 3b^2)(a - c) - \frac{3}{2} b [(b - c)^2 - (b - a)^2] \\ + \frac{1}{3} [(b - c)^3 - (b - a)^3];$$

en calculant cette expression pour

a	8,6 ^{cm}
b	28
c	18,5

on trouve, pour la valeur de l'intégrale,

$$A = 3,267.$$

En calculant alors, d'après les données numériques de chaque expérience, le coefficient

$$B = \frac{k \mu n}{V e}.$$

La déviation qu'on devrait observer dans chaque expérience sera égale au produit AB .

Mesure du potentiel de charge. — Le potentiel de charge était connu à 2 volts près par le nombre d'éléments pris sur la batterie, la force électromotrice de chaque élément étant toujours très voisine de 2, 2 volts.

Les potentiels utilisés étant d'au moins 4000 volts, aucun appareil de mesure ne m'aurait donné commodément sa valeur avec autant d'exactitude, je n'ai donc pas cherché à le mesurer. Mais il pouvait se produire des pertes le

long de la ligne qui mesure plus de 40^m, et sur lesquels 12^m environ sont à l'extérieur des bâtiments.

Aussi, au début de chaque journée d'opération, je vérifiai la valeur du potentiel à l'aide d'un électromètre absolu système Bichat et Blondlot.

La formule de cet appareil est la suivante :

$$V^2 = 3,786 p \text{ grammes,}$$

V^2 étant le carré du potentiel cherché.

Un miroir plan placé sur le fléau de l'appareil permet d'observer ses déviations par la méthode de Poggendorf.

En le sensibilisant au maximum on peut avoir, dans une lunette placée à 2^m du miroir, une déviation de dix divisions pour un milligramme. Le dixième de milligramme correspond, pour des potentiels de 15 C.G.S. électrostatiques, à des différences de 6 volts.

Cette vérification m'a servi à plusieurs reprises à indiquer des pertes sensibles qui provenaient toujours de la partie du circuit située à l'extérieur. Après de fortes pluies, en particulier, il se produisait des pertes de plus d'un tiers.

J'ai dû, à plusieurs reprises, changer les tubes de caoutchouc qui protégeaient le fil à son passage sur les supports en porcelaine.

Mais dans les calculs j'ai toujours pris, comme valeur du potentiel de charge, le produit du nombre des éléments par 2, 2.

M. le Professeur Bouty, qui se servait de la même batterie, avait déterminé la valeur du potentiel de chaque série de 45 éléments et c'est à son obligeance que je dois le nombre précédemment indiqué.

Mesure du nombre de tours du disque. — Il aurait été bien difficile d'installer un compteur de tours directement sur l'axe du disque.

Si j'avais eu des résultats positifs, rendant utiles des

mesures rigoureuses, j'aurais cependant fait cette installation.

Mais les essais que j'ai faits ayant toujours été négatifs, je me suis contenté de la méthode suivante :

J'ai déterminé, pour différentes vitesses et avec différentes courroies, l'entraînement du disque par la dynamo, par une méthode stroboscopique.

Pour cela j'éclairais, à l'aide d'un miroir placé sur un diapason entretenu électriquement, les têtes d'acier poli des deux vis qui arrêtent la poulie d'ébonite sur le moyeu.

Ce diapason ($1a_3$) fait 435 vibrations par seconde. Je modifiais la résistance des rhéostats de la dynamo motrice jusqu'à obtenir l'immobilité apparente des têtes de vis. J'avais ainsi un nombre de tours dont le double était un multiple de 435.

Je mesurais alors avec un compteur le nombre de tours de la dynamo. La poulie de celle-ci ayant un diamètre qui est exactement 5 fois plus grand que celui de la poulie du disque, j'avais du même coup l'ordre du multiple de 435 qui était le nombre de tours du disque, et la valeur de l'entraînement. Avec les cordes à boyaux soigneusement résinées et directes, il y avait une perte d'un dixième. Avec les mêmes cordes croisées, cette perte était sensiblement nulle, l'enveloppement des poulies étant beaucoup meilleur.

Ceci établi et vérifié à plusieurs reprises, je me suis contenté, dans la suite de mes opérations, de mesurer le nombre de tours de la dynamo, que je multipliais par 5 et dont je soustrayais un dixième quand la courroie était directe.

Ce nombre de tours variant un peu pendant la durée d'une expérience, je faisais une détermination au commencement, une au milieu et une à la fin, chacune durant trente secondes, le chiffre adopté étant la moyenne des trois nombres obtenus.

Mesure de la distance des disques aux armatures. — Ce n'était pas à proprement parler une mesure. Je réglais, au début, l'appareil à l'aide des épaulements vissés qu'on voit sur la *fig.* 9, de façon que la distance de chaque paroi du disque à la couronne en regard fût égale des deux côtés. Un pied à coulisse au dixième de millimètre suffisait à cet usage.

La valeur de e était alors la moitié de la différence entre l'épaisseur du disque et la largeur de la fente (8^{mm}).

Marche des expériences. — Toutes les expériences ont été faites de la façon suivante :

On vérifiait en première ligne l'isolement du disque ; on vérifiait ensuite que le fonctionnement à blanc de chaque partie de l'appareil était sans influence sur le galvanomètre.

Pour cela, on faisait fonctionner l'interrupteur d'abord à blanc, puis en chargeant le disque au repos. On faisait la même vérification pour le moteur du disque et puis pour le mouvement du disque lui-même.

On faisait alors l'expérience complète :

Le disque et l'interrupteur étaient mis en fonctionnement. Il se produisait des impulsions dues à l'induction des circuits des dynamos, surtout de la grande. Le régime stable une fois établi dans les deux appareils tournants, l'aide placé au galvanomètre attendait que le spot fût stable depuis vingt à trente secondes.

On mettait alors le disque en charge avec un des pôles de la pile. Aussitôt après on mesurait la vitesse de rotation, la position du spot ayant été notée pendant cette opération, on inversait le pôle de charge et l'on notait au bout de vingt secondes la position du spot. Enfin une troisième inversion et une troisième lecture avaient lieu, pendant lesquelles on faisait une deuxième détermination de la vitesse.

Une troisième détermination était faite deux minutes après.

On arrêtaît alors l'interrupteur et l'on vérifiait que le disque, encore en mouvement, était bien isolé et gardait sa charge quelques minutes sans perte appréciable. Puis on arrêtaît le disque en le laissant en communication avec l'électroscope de façon à voir si l'arrêt ne modifiait rien dans l'isolement.

J'ai toujours opéré avec un aide au galvanomètre. L'expérience aurait été impossible à faire par une seule personne.

Résultats. — J'ai fait ainsi un assez grand nombre de séries, toutes négatives, avec un disque d'aluminium de $\frac{5}{10}$ de millimètre d'épaisseur, tournant entre les couronnes de fonte garnies de plateaux de verre de 2^{mm} d'épaisseur soigneusement gomme-laqués. Ces couronnes étaient destinées à la fois à augmenter la capacité du disque et à éviter des étincelles entre le disque et les couronnes de fonte qui étaient au sol.

Les déviations maxima obtenues étaient de 7^{mm} alors que le minimum calculé était de 37^{mm}. De plus, le sens de ces déviations ne concordait qu'accidentellement avec le sens prévu.

Objections diverses. — J'ai alors montré mes résultats à M. le Professeur Pellat.

Il voulut bien me faire observer que la charge du disque pouvait aller se coller contre les faces de verre en regard qui formaient, avec la fonte située de l'autre côté, un condensateur de plus grande capacité. Dans ces conditions, le disque n'aurait pas été chargé.

Cependant ce disque, relié à l'électroscope, accusait une charge; mais celle-ci pouvait provenir des condensateurs de grande capacité formés par la partie du disque comprise entre les pièces d'ébonite E (*fig. 9*), le mica et les écrous de serrage reliés au sol.

Première vérification. — Pour voir ce qu'il en était, je déboulonnais les deux couronnes et l'une des extrémités

de l'axe de façon à pouvoir éloigner une moitié de l'appareil de l'autre, tout en les laissant parallèles entre elles. Il suffisait pour cela de faire coïncider lentement deux pièces de bois reliées par un écrou entre les socles des deux couronnes.

Le disque fut chargé et relié à l'électroscope qui prit une certaine déviation.

J'éloignais alors très lentement l'une des moitiés de l'appareil de l'autre et constatais que la divergence des feuilles d'or augmentait.

Or, en éloignant le disque d'une des parois de fonte, je diminuais sa capacité et une partie de sa charge passait dans l'électroscope qui divergeait davantage.

Aucun effet analogue n'aurait été constaté si la charge avait été dans les parties du disque comprises entre l'ébonite, la capacité de ces parties ne variant pas dans cette vérification.

Deuxième vérification. — Malgré cette vérification qui me paraît décisive, je supprimai les plateaux de verre et essayai l'expérience. Mais la distance entre la fonte et le disque était trop faible ($3^{\text{mm}}, 75$) : l'étincelle éclatait, et aucune charge ne restait sur le disque.

Entre temps, j'avais, sur le conseil de M. Pellat, installé à poste fixe la spire témoin dont j'ai parlé plus haut, et dont l'usage a donné une bien plus grande netteté à mes expériences.

De plus, dans un mouvement brusque, je faussai complètement le disque d'aluminium.

J'en refis un autre de 1^{mm} d'épaisseur, plus lourd par conséquent, mais ne se gondolant pas par la rotation. Je cherchais à coller sur ce disque différents diélectriques pour éviter l'étincelle.

J'ai essayé successivement du mica de $\frac{1}{10}$ de millimètre d'épaisseur, de l'ébonite de $\frac{5}{10}$ de millimètre d'épaisseur, des feuilles de caoutchouc de $\frac{2}{10}$ de millimètre. Aucune de ces

substances n'a été suffisamment résistante pour supporter des vitesses de 120 tours ou même de 100 tours par seconde.

Le mica et l'ébonite se brisèrent en mille morceaux pour une vitesse de 80 tours environ. Le caoutchouc se décolla, s'allongea, vint frotter les couronnes et fut complètement déchiré.

J'essayai alors, sur le conseil de M. Carvalho, de répandre sur le disque du collodion ou une solution de caoutchouc.

Le collodion formait bien, après évaporation, une membrane extrêmement rigide, électrostatiquement parlant, mais, aux premières variations de température, cette membrane se décolla d'elle-même.

Je fus plus heureux avec le caoutchouc. Je réussis à former, par évaporation d'une solution dans la benzine cristallisable de caoutchouc pur, une membrane continue, extrêmement mince, mais cependant très suffisamment résistante à la fois à l'étincelle et à la rotation. Cette membrane n'a pas $\frac{5}{100}$ de millimètre d'épaisseur.

Un usage continu de ce procédé m'a permis de le perfectionner et d'en obtenir des résultats remarquables au double point de vue de l'isolement et de la rigidité électrostatique.

Les surfaces à isoler doivent d'abord être vernies à la gomme-laque. Il est indispensable que ce vernis ait été fait avec de l'alcool absolu. Dans tous les autres cas, la gomme-laque qui reste après évaporation de l'alcool est légèrement hydratée, et ceci suffit à donner des phénomènes d'électrolyse extrêmement gênants.

D'ailleurs, du vernis à 4 ou 5 pour 100 de gomme-laque est tout à fait suffisant. Sur cette première couche de vernis on répand de la solution de caoutchouc dans la benzine. Cette solution doit être faite à raison de 5 pour 100 de caoutchouc dit *pur para* dans de la benzine cristallisable. Les solutions toutes faites du commerce sont,

en général, mélangées de nombreuses impuretés et donnent de très mauvais résultats.

Pour répandre également la solution sur toute la surface il est bon d'en verser un assez grand excès que l'on étend ensuite avec une lame flexible légère. Une lame de mica est tout à fait commode pour cet usage.

Il faut environ une heure pour que cette couche soit suffisamment sèche. Il faut alors la vernir à la gomme-laque. Cette précaution a pour effet à la fois d'augmenter la solidité de la couche et d'éviter que celle-ci se colle et, par suite, s'écorche contre tout ce qui la touche.

Si l'on a besoin d'une très grande rigidité, on peut superposer 2 ou 3 couches successives de caoutchouc et de vernis.

Par ce procédé je suis arrivé à avoir des disques qui conservaient des charges à 4000 ou 6000 volts pendant *plusieurs semaines*, et sans perte appréciable.

De plus, la rigidité électrostatique est telle qu'en touchant la surface de l'enduit, on ne décharge pas le corps qu'il protège, à moins que le potentiel dépasse 1000 ou 1500 volts environ.

J'ai fait, avec le disque ainsi préparé, une série d'expériences dans lesquelles plusieurs lectures de 10 en 10 secondes étaient faites pour chaque phase opératoire. De plus, dans cette série, on a substitué la spire témoin au disque tournant sans arrêter celui-ci, et vérifié que la spire témoin donnait bien la déviation attendue quand le disque ne donnait rien.

Troisième vérification. — Les résultats de la série faite avec le disque nu, pouvaient s'interpréter en disant que la charge n'est pas entraînée par le conducteur à la surface duquel elle se manifeste.

Ceux de la deuxième série pouvaient s'interpréter aussi en disant que ni le diélectrique, ni le conducteur, n'entraînent la charge manifestée à leur surface de séparation.

Mais ces objections conservent leur valeur pour les expériences de M. Rowland, en particulier pour celles faites à Baltimore, et dans lesquelles la couche métallique, chargée par influence, ne présente aucune partie isolée des autres.

Quatrième vérification. — Toutefois, sur le conseil de M. le Professeur H. Poincaré, j'ai fait une expérience avec un disque en ébonite portant trois secteurs dorés isolés les uns des autres par des bandes radiales de 10^{mm} de large. Ce disque est aussi protégé par une membrane de caoutchouc. Chacun des secteurs est relié à une portion de bague métallique montée sur ébonite, ce qui forme une sorte de collecteur triphasé. L'intervalle entre les parties du collecteur est de 16^{mm}.

L'isolement complet de toutes ces parties a été soigneusement vérifié. Le disque faisant 100 ou 120 tours par seconde, et l'interrupteur 17 tours, la phase de charge ou de décharge de durée $\frac{T}{2}$ correspond par conséquent à $\frac{1}{60}$ de seconde environ ; comme le disque fait deux tours pendant cet intervalle, on est assuré que tous les secteurs étaient bien chargés ou déchargés à chaque phase de l'interruption.

De plus, en chargeant un seul des secteurs et faisant tourner le disque, je me suis assuré qu'aucune charge n'avait passé, par suite de la rotation, sur les autres secteurs.

Les résultats obtenus avec ce disque ont encore été négatifs. Cette fois cependant il semble bien certain que la charge est entraînée.

Cinquième vérification. — M. le Professeur Blondlot me fit alors observer que si le disque d'ébonite à secteurs isolés entraîne sa charge avec lui, la charge induite sur les armatures de fonte, qui sont continues, tourne en même temps que celle du disque. Comme elle est de signe contraire, elle produira un effet justement égal et de sens inverse. L'effet total observé sera encore nul.

J'ai alors garni la face interne des couronnes de fonte de lames de mica de 0^{mm} , 2 d'épaisseur. Sur ces lames, soigneusement vernies, j'ai collé six secteurs de papier d'étain de 60° , séparés les uns des autres par des intervalles de 10^{mm} , et séparément reliés au sol. Dans ces conditions, la charge induite ne peut être entraînée.

Une série d'expériences reprises avec cette disposition a donné des résultats identiques à ceux des séries précédentes.

Sixième vérification. — M. Blondlot me fit une autre objection. Quand on envoie dans la spire témoin ou dans les spires du disque étalon des courants de conduction, ceux-ci sont équivalents à ce que l'on calcule pour l'effet total du disque agissant par convection. Ces courants de conduction sont de l'ordre de 2×10^{-4} ampères, et, pour la valeur correspondante du champ, l'expérience montre que la perméabilité magnétique du fer est assez élevée.

Mais le disque tournant chargé équivaldrait à une nappe de courant, et la densité du courant, suivant chaque couronne élémentaire de la couronne dorée est extrêmement faible, de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-6} ampères. Or, nous ignorons ce que peut être la perméabilité du fer pour des champs très faibles; elle pourrait être très petite et exiger de plus un temps notable avant de s'établir.

Pour répondre expérimentalement, j'ai repris le disque d'ébonite étalon, sur lequel j'ai cousu, de centimètre en centimètre, des spires de fil de diamètre croissant de 17^{cm} à 37^{cm} . Ces spires avaient de plus une section calculée de façon que leur résistance fût proportionnelle à l'intensité du courant de la spire correspondante et, par conséquent, en raison inverse du rayon de la couronne occupée par la spire.

Ces spires ont été réunies en dérivation, et j'ai mis aux deux extrémités de l'ensemble une force électromotrice telle que l'intensité totale réalisée équivalait à $\frac{1}{3000}$ d'ampère. D'ailleurs, cette intensité a été soigneusement mesu-

rée avec un galvanomètre Thomson, par une méthode différentielle.

Ce disque occupait la place du disque tournant et, traversé par ce courant interrompu toujours de la même manière, a donné une déviation très sensiblement identique à celle du même courant circulant dans une seule spire dont le diamètre est égal à la moyenne des dix autres, c'est-à-dire à $31^{\text{mm}}, 8$.

Septième vérification. — Enfin une dernière objection s'est présentée.

Le disque était chargé et déchargé plusieurs fois par seconde. Le circuit de charge pouvait être tel que, pour une fréquence déterminée, la décharge devint oscillante et, par conséquent, ne se fit plus qu'incomplètement. En même temps, la bobine induite, dont la self-induction est assez grande, pouvait présenter une constante de temps dont l'effet s'ajouterait à celui d'une décharge oscillante.

Le calcul ne pouvait rien donner de précis, à cause de la grande difficulté de mesurer ou de calculer avec quelque exactitude la capacité et la self-induction du circuit de charge ou du circuit induit avec son armature de fonte. Mais l'expérience directe suffit à écarter toute espèce de doute.

D'une part, j'ai dit que j'avais essayé l'effet de la variation de fréquence de l'interruption sur les spires témoins aussi bien que sur la charge du disque, pour des fréquences variant de cinq à vingt-deux secondes. Or, l'effet du disque tournant est resté toujours le même.

D'autre part, j'ai fait varier la valeur de la self-induction et de la capacité du circuit en substituant, à la résistance liquide à grande capacité de polarisation interposée entre le disque et l'interrupteur, plusieurs résistances très différentes.

J'ai mis :

1° Une bande d'ébonite frottée de graphite et présen-

tant une résistance approximative de 100 000 ohms, avec une capacité presque nulle;

2° Un fil de fer de $\frac{1}{50}$ de millimètre de diamètre, de 3^m de long, roulé sur un cylindre d'ébonite, présentant une capacité nulle et une résistance de 900 ohms environ;

3° Ce même fil mis en tension avec un tube de verre de 30^{cm} de long, 4^{mm} de diamètre, contenant une solution de sulfate de cuivre à 10 pour 100.

Des expériences ont été faites avec chacune de ces trois modifications. Et, chaque fois, on a essayé les fréquences d'interruption de 5 à 22.

Les résultats ont été constamment les mêmes, toujours négatifs.

Voici maintenant les chiffres relatifs à différentes séries :

J'ai adopté les notations suivantes :

μ + ou — potentiel et signe de la charge ;

N nombre de tours par seconde du disque ;

n_r ou n_f nombre de tours par seconde de l'interrupteur fonctionnant à la rupture ou à la fermeture ;

R + rotation du disque dans le sens d'une vis à droite ;

R — rotation du disque dans le sens d'une vis à gauche ;

B valeur du coefficient $\frac{k \mu n}{V_e}$;

$\Lambda = 3,267$;

δ + déviation attendue vers les chiffres croissants de l'échelle graduée ;

δ — déviation attendue en sens inverse ;

δ' + ou — déviation observée ;

σ densité superficielle.

J'indique, de plus, les lectures faites en mettant simplement au-dessus de chaque chiffre ou colonne la désignation de la phase expérimentale correspondante.

Je donne seulement six exemples. Les cinq premiers sont choisis comme représentant la moyenne.

Le sixième est, au contraire, un des plus mauvais, au point de vue de la stabilité du galvanomètre.

Séries avec le disque d'aluminium de $\frac{5}{10}$ de millimètre d'épaisseur tournant entre deux plateaux de verre.

1. $\mu = 4200$ volts.	$N = 121$ tours.	$R +$.	$n_f = 17$.
Petite dynamo (1).	Disque immobile, chargé avec l'interrupteur (2).	Grosse dynamo (3).	Charge du disque en mouvement (4).
335	$\mu +$ 346	$\mu +$ 370	$\mu +$ 367
	$\mu -$ 345		$\mu -$ 372
			$\mu +$ 373
$B = 108,10^{-4}$.	$A = 3267$.		
$\delta = + 35,5$.	$\sigma = 5,6$.		
$\delta' = + 2$.			

Série qualitative pour essayer l'influence de la valeur de n .

2. $\mu = 4500$ volts.	$N = 112$ tours.	$R +$.	$n_f = 9$.
(1).	(2).	(3).	(4).
293	$\mu -$ 328	$\mu -$ 300	$\mu -$ 301
	$\mu +$ 327		$\mu +$ 297
		293	
$\delta = -$.			
$\delta' = 3,5$.	$\sigma = 6$.		

$$\begin{array}{c}
 3. \quad \mu = 5100 \text{ volts,} \\
 \quad (1). \\
 \quad 330 \qquad \qquad \qquad N = 122 \text{ tours,} \\
 \qquad \qquad \qquad (2). \\
 \qquad \qquad \qquad \left\{ \begin{array}{c} \mu + \\ 332 \end{array} \right. \qquad \left\{ \begin{array}{c} \mu - \\ 335 \end{array} \right. \qquad \left\{ \begin{array}{c} \mu + \\ 337 \end{array} \right. \\
 \qquad \qquad \qquad B = 159 \times 10^{-4} \quad A = 3267. \\
 \qquad \qquad \qquad \delta = -51.9. \\
 \qquad \qquad \qquad \delta' = +2. \\
 \qquad \qquad \qquad \sigma = 6, 8.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 4. \quad \mu = 5100 \text{ volts,} \\
 \quad (1). \\
 \quad 212 \qquad \qquad \qquad N = 102 \text{ tours,} \\
 \qquad \qquad \qquad (2). \\
 \qquad \qquad \qquad \left\{ \begin{array}{c} \mu - \\ 214 \end{array} \right. \qquad \left\{ \begin{array}{c} \mu + \\ 214 \end{array} \right. \qquad \left\{ \begin{array}{c} \mu - \\ 216 \end{array} \right. \\
 \qquad \qquad \qquad B = 1336 \times 10^{-5} \quad A = 3267. \\
 \qquad \qquad \qquad \delta = -43.6, \\
 \qquad \qquad \qquad \delta' = -4.5. \\
 \qquad \qquad \qquad \sigma = 6, 8.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 R - . \\
 (3). \\
 265 \qquad \qquad \qquad n_r = 17. \\
 \qquad \qquad \qquad (4). \\
 \qquad \qquad \qquad \left\{ \begin{array}{c} \mu + \\ 266 \end{array} \right. \qquad \left\{ \begin{array}{c} \mu - \\ 269 \end{array} \right. \qquad \left\{ \begin{array}{c} \mu + \\ 268 \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 R + . \\
 (3). \\
 290 \qquad \qquad \qquad n_f = 17. \\
 \qquad \qquad \qquad (4). \\
 \qquad \qquad \qquad \left\{ \begin{array}{c} \mu - \\ 289 \end{array} \right. \qquad \left\{ \begin{array}{c} \mu + \\ 282 \end{array} \right. \qquad \left\{ \begin{array}{c} \mu - \\ 284 \end{array} \right.
 \end{array}$$

*Exemple de séries avec un disque d'aluminium de 1^{mm} d'épaisseur, recouvert de caoutchouc.
Les couronnes de fonte nues. Lectures de 10⁵ en 10⁵.*

$\mu = 4200.$	N = 97.	R +.	$n_r = 17.$	$\sigma = 3,1.$
Petite dynamo (1).	Charge du disque au repos (2).	Grosse dynamo (3).	Charge du disque en mouvement (4).	Spire témoin, $\frac{4}{10\,000}$ d'ampère (5).
	$\mu +$	$\mu +$	$\mu +$	$-$
	»	»	»	»
176	$\mu -$	»	$\mu -$	$+$
175,5	»	»	»	»
176	173	242	245	153
176	175	242	248	175
174,5	177	242	250	155
174	174	243	253	177
174	173	243	251	154
174	173	243	247	180
»	»	»	246	154
»	»	»	247	180
»	»	»	254	»
»	»	»	246	»
»	»	»	246	»
173,5	174,7	»	249,8	154
174,7	174,7	»	248,8	178
$B = 611 \times 10^{-5}.$	$A = 3267.$			
$\hat{\sigma} = +19,9.$				
$\hat{\sigma}' = +2.$				

Exemples de séries avec le disque d'ébonite à secteurs isolés. Lectures de 10^8 en 10^4 .

$\mu = 4500.$	$N = 121, 6.$	R —.	$n_r = 17.$	$\sigma = 3, 9.$
(1).	(2).	(3).	(4).	(5).
359	$\begin{array}{c} \mu + \\ 375 \end{array}$		$\begin{array}{c} \mu + \\ 425 \end{array}$	$\begin{array}{c} - \\ 403 \end{array}$
358	367	423	$\begin{array}{c} \mu - \\ 435 \end{array}$	$\begin{array}{c} + \\ 430 \end{array}$
358	363	425	430	403
358	361	428	429	405
358	360	425	435	429
	$\begin{array}{c} \mu + \\ 371, 2 \end{array}$		$\begin{array}{c} \mu + \\ 430 \end{array}$	$\begin{array}{c} \mu \\ 403, 6 \end{array}$
	369		433	429, 6
	$\begin{array}{c} \mu - \\ 371, 2 \end{array}$		$\begin{array}{c} \mu - \\ 433 \end{array}$	
	362, 7		432, 2	
	359, 5			
	$A = 3267.$			
$B = 973.10^{-8}.$				
$\delta = -31, 8.$				
$\delta' = +4, 8.$				

TROISIÈME PARTIE.

RÉPÉTITION DES EXPÉRIENCES DE M. ROWLAND.

Les résultats nettement négatifs des expériences précédentes, rapprochés de ceux obtenus au sujet de l'existence de l'effet inverse, sont de nature à faire douter à la fois de l'existence du champ électrique dû à des variations magnétiques et de l'effet magnétique de la convection électrique.

Mais il est dangereux de conclure à la légère, surtout lorsque les expériences sont très délicates et qu'il est à peu près impossible d'en éliminer toutes les causes d'erreur.

D'ailleurs il restait toujours les résultats de M. Rowland, confirmés par deux séries d'expériences faites à treize ans d'intervalle avec des appareils différents, et aussi ceux de M. Himstedt.

Ces savants ont certainement vu un effet ressemblant assez à celui attendu de la convection électrique, pour qu'ils aient pu confondre; ou bien on pouvait admettre que, dans leurs expériences, plus simples que les miennes, certains facteurs, qui pouvaient m'avoir échappé, se trouvaient éliminés d'eux-mêmes.

J'ai alors entrepris de répéter leurs expériences.

J'ai utilisé, pour cela, la plus grande partie de l'appareil qui avait servi pour les essais précédents; je pourrai donc me borner, dans ce qui va suivre, à des descriptions assez succinctes.

Disque tournant, armature et dynamo motrice. — L'expérience consiste à faire tourner un disque chargé et à observer les mouvements d'une aiguille aimantée placée parallèlement au plan du disque.

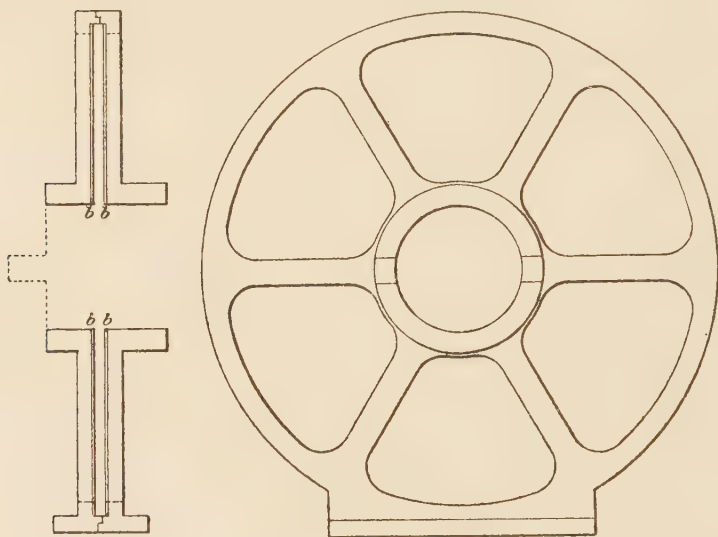
J'ai utilisé le disque en ébonite de l'expérience précédente.

Mais son armature de fonte était tout à fait impropre à la nouvelle expérience.

Je l'ai remplacée par un bâti de bronze dont la *fig. 11* montre le plan et la coupe.

Ce bâti est en deux parties s'emboîtant l'une dans l'autre et réunies par six écrous de bronze. L'épaisseur du bronze

Fig. 11.



est de 10^{mm} . Les rayons ont 20^{mm} de largeur. La partie centrale a été faite de façon que les lames d'acier qui soutenaient l'axe du disque dans l'appareil précédent s'adaptassent exactement sur elle.

Le diamètre de la cavité intérieure est de 39^{cm} , sa largeur de 14^{mm} .

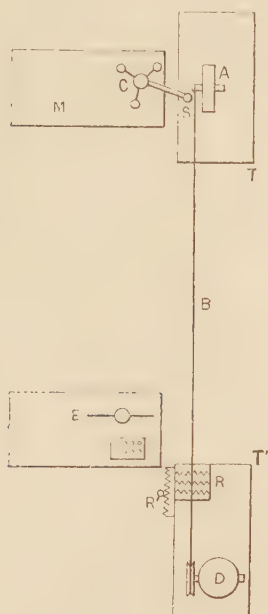
Pour fermer cette cavité, et former en même temps des armatures externes, j'ai vissé sur les rayons du bâti deux plateaux de laiton *b b*, de $\frac{15}{10}$ de millimètre d'épaisseur.

Les seules raisons qui m'avaient guidé dans ce choix étaient la solidité et le montage facile.

D'ailleurs, la face interne de ce plateau a été recouverte de mica, sur lequel on a collé ensuite des secteurs d'étain de 60° , séparés entre eux par des raies de 10^{mm} , pour éviter l'entraînement par le disque tournant de la couche électrique induite sur ces armatures.

Tout le bâti était constamment relié au sol. Il était d'ail-

Fig. 12.



leurs fixé solidement sur un socle de bois épais reposant, par l'intermédiaire de plaques de caoutchouc, sur une forte table T fixée sur le plancher du laboratoire (fig. 12).

La dynamo D était fixée sur une table T' identique à la précédente, mais éloignée de celle-ci de $6^{\text{m}}, 50$, de façon à soustraire le système magnétique à l'influence du champ de cette dynamo.

Celle-ci était la même que dans les précédents essais.

La table portant la dynamo reposait aussi sur le plancher du laboratoire.

Le mouvement est transmis par une corde à boyau B de 13^m,60 de longueur, en un seul morceau. Cette corde est toujours soigneusement résinée.

Système astatique. — Le système astatique est formé de quatre aiguilles d'acier de 10^{mm} de longueur, 2^{mm} de largeur. Ces aiguilles sont collées deux à deux aux extrémités d'une lame de mica de 11^{cm} de long, 10^{mm} de large, de façon à former un système astatique.

La lame porte, de plus, un miroir concave de 4^m de rayon.

Ce système est suspendu par un fil de cocon de 10^{cm} de long au centre d'un tube de cuivre rouge de 16^{mm} de diamètre intérieur, portant une ouverture munie d'un tube et destinée à observer le miroir.

Pour supporter ce tube, j'ai pris un cathétomètre. La lunette de celui-ci a été enlevée et remplacée par un tube de laiton épais, de même diamètre extérieur et de 70^{cm} de longueur.

A l'une des extrémités de ce tube on a fixé verticalement le système astatique et son enveloppe, et, au-dessus, une tige de laiton destinée à supporter les aimants directeurs du système.

A l'autre extrémité se trouve un contrepoids calculé de façon que presque toute la longueur du tube puisse déborder le support du cathétomètre.

D'ailleurs, deux pièces accessoires permettent de donner à la position du système astatique ainsi supporté tous les réglages que comporte un cathétomètre.

Ce cathétomètre C (*fig. 12*) repose sur un monolithe M, fondé dans les caves de la Sorbonne.

Le système astatique se trouvait ainsi soustrait aux trépidations dues à la rotation du disque.

Mais il était malheureusement soumis à celles prove-

nant de la circulation dans les rues voisines. Leur effet se trouve même augmenté par la forme de l'appareil de support. J'ai pu les atténuer en faisant reposer le cathétomètre sur des rondelles de caoutchouc et en chargeant son pied de lourdes masses de plomb.

Spire témoin. — J'ai fixé dans l'appareil une spire témoin. J'ai calculé son diamètre, comme si l'aiguille inférieure du système astatique était à environ 10^{mm} au-dessus du bord supérieur du disque tournant, et placée dans le plan de ce disque. J'ai, de plus, assimilé le disque à un courant rectiligne indéfini.

Ces conditions sont assez voisines de celles réalisées expérimentalement pour que l'approximation qui en résulte soit légitime. D'ailleurs, le calcul exact est inabordable.

Soit alors r le rayon en un point du disque doré sur une couronne de rayons r_1 et r_2 . On a vu que l'intensité du courant de convection était

$$(1) \quad di = k r dr,$$

k étant connu par les données de chaque expérience.

Soit b la distance du centre du disque à un pôle magnétique unité, placé comme il a été dit.

L'action du courant (1) sur ce pôle sera

$$df = \frac{2 di}{b - r} = \frac{2 k r dr}{b - r}.$$

L'action totale sera

$$(2) \quad f = 2k \int_{r_1}^{r_2} \frac{r dr}{b - r}.$$

D'ailleurs, l'action sur le même pôle du courant de conduction d'intensité égale à celle de la convection et circulant dans une spire de rayon x serait

$$(3) \quad f = \frac{2k \int_{r_1}^{r_2} r dr}{b - x}.$$

Égalant (2) et (3), on a

$$(4) \quad \int_{r_1}^{r_2} \frac{r \, dr}{b-r} = \frac{1}{b-x} \int_{r_1}^{r_2} r \, dr.$$

Pour $r_1 = 8,5$; $r_2 = 18,5$; $b = 19,5$ on tire de (54)

$$x = 15,8.$$

Une spire de diamètre égal à $31^{\text{cm}},6$ a été fixée dans un des plateaux de laiton bb , dans lequel on avait pratiqué un sillon circulaire convenable.

Les deux extrémités de cette spire sont reliées à un fil double dont les extrémités aboutissent à une table O (*fig. 12*), sur laquelle se trouvent un accumulateur et une boîte de résistance. Avec une double clef de Sabine on peut envoyer, dans cette spire et dans un sens quelconque, un courant d'intensité réglable.

D'ailleurs, sur la même table O se trouvent disposés l'échelle servant à l'observation du système astatique et les pôles de la pile de charge. Les résistances R et R', qui commandent la dynamo T', sont à côté, en sorte qu'un seul observateur suffit à l'expérience.

Réglage et sensibilité du système astatique. — Le système astatique est commandé par un double aimant directeur. Ce sont des aimants en arc de cercle de 20^{cm} de long environ. En les plaçant l'un au-dessus de l'autre, les pôles de noms contraires respectivement opposés, on obtient la sensibilité qu'on désire en donnant aux axes des aimants un angle très faible.

Un des aimants porte une vis sans fin qui commande une roue dentée solidaire de l'autre aimant, ce qui rend le réglage très facile.

Le système est placé soit dans le plan du disque, à 10^{mm} au-dessus de son bord supérieur, soit parallèlement à ce plan, à 10^{mm} ou 15^{mm} en avant et au niveau du bord supérieur.

La mesure de la sensibilité se fait en envoyant dans la

spire témoin des courants d'intensité connue et notant les déviations observées à l'échelle placée à 4^m de distance.

En assimilant à un galvanomètre l'ensemble du système astatique et de la spire témoin, j'ai trouvé, comme sensibilité de ce système (formule de Kohlraush), des nombres variant, suivant la position des aimants directeurs, de

$$2 \times 10^5 \text{ à } 3,7 \times 10^5.$$

Mais pour les sensibilités dépassant 3×10^5 , les observations deviennent très difficiles à cause de la grande instabilité de l'aiguille. Aussi je me suis tenu le plus souvent à une sensibilité voisine de 3×10^5 .

Marche d'une expérience. — Chaque expérience se faisait dans l'ordre suivant :

1° Vérification de la sensibilité du système astatique avec la spire témoin ;

2° Vérification de la non-action sur le système de la charge du disque immobile ;

3° Mise en marche du disque non chargé pour vérifier qu'il n'agit pas sur l'aiguille aimantée ;

4° Charge du disque suivie de plusieurs inversions du signe de la charge, entremêlées de mises au sol fréquentes ;

5° Vérification, le disque chargé toujours en marche, de la sensibilité du système astatique ;

6° Vérification à l'aide d'un électroscope sensible, de l'isolement du disque.

Les disques dorés employés étaient du reste isolés avec le plus grand soin et pouvaient garder une charge pendant *plus d'une semaine*.

D'ailleurs, pour être sûr que la charge prise par chaque secteur du disque tournant était bien celle calculée, un balai de fil de platine, glissant dans un tube d'ébonite épais, traversait la joue de l'une des moitiés du bâti de bronze et pouvait être mis à chaque instant en contact avec le disque.

En reliant le balai à l'une des bornes d'un galvanomètre balistique, dont l'autre borne était au sol, il était facile de vérifier quelle était la charge de chaque secteur. Cette vérification se faisait à la fin de toutes les expériences, après que le pôle de charge du disque avait été isolé et le disque arrêté.

Intensité calculée et déviations attendues. — Le potentiel de charge était de 4000 à 6000 volts. La vitesse de rotation de 80 à 120 tours par seconde. L'épaisseur de la couche d'air comprise entre les faces du disque et les plateaux fixes de 4^{mm}.

L'intensité du courant de convection serait, d'après ces données, de

$$7 \times 10^{-5} \text{ à } 5 \times 10^{-4} \text{ ampères.}$$

Les déviations correspondantes étaient, suivant la sensibilité, de 12^{mm} à 175^{mm}. Mais, en général, je réglais cette sensibilité de façon à avoir, avec la spire témoin parcourue par un courant égal à celui calculé pour la convection, des déviations de 50^{mm} à 70^{mm}.

Résultats observés. — Les déviations observées en inversant le signe de la charge ont été constamment nulles, quel que soit d'ailleurs le sens de la rotation.

Le principe de l'expérience étant le même que celui de M. Rowland, j'ai recherché dans les différences de détail la cause de la différence de résultats observés.

Procédé de charge du disque. — M. Rowland et M. Hilmstedt chargeaient leurs disques avec des balais ou des pointes placés près de la périphérie.

Dans mes expériences, au contraire, la charge se fait par un balai axial.

L'emploi de balais ou de pointes périphériques a pour conséquences des étincelles dont la direction est changée par le sens de la rotation du disque. Ces étincelles se comportant comme de petits éléments de courant, de direction variable, pouvaient avoir causé les déviations observées par M. Rowland.

J'ai essayé, à l'aide du balai de platine servant à la vérification de la charge, l'effet de ce mode de charge. J'ai aussi remplacé ce balai par une pointe placée à 1^{mm} du disque. Le résultat est resté le même, je n'ai obtenu aucune déviation.

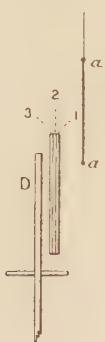
Rôle des armatures fixes. — Il y avait une autre différence entre les dispositifs de M. Rowland et de M. Himstedt et le mien. Dans leurs expériences, le système asta-

Fig. 13.



tique *aa* (*fig. 13*) se trouve séparé du disque tournant *D* par des plateaux fixes formés de secteurs d'étain 1 collés sur de l'ébonite ou du verre 2.

Fig. 14.



Dans mes expériences, le système *aa* (*fig. 14*) est

séparé du disque par deux couches métalliques : laiton 1, étain 3, entre lesquelles se trouve la feuille de mica 2.

J'ai alors remplacé ces plateaux laiton, mica, étain, par des plateaux ébonite-étain. Dans ces conditions, j'ai obtenu des déviations réversibles à la fois avec le signe de la charge et le sens de la rotation du disque ; leur sens coïncide avec celui que donnerait l'effet magnétique de la convection électrique.

C'est là le résultat de M. Rowland et de M. Himstedt. Mais le hasard de l'expérimentation m'a permis de constater que ces déviations disparaissent dès qu'on interpose une seconde couche métallique, parallèle et voisine de la couche d'étain, entre le disque et le système astatique.

Ces déviations ne sont donc pas dues au champ magnétique du courant continu auquel équivaldrait la convection électrique. Une plaque métallique ne peut, en effet, ni diminuer ni supprimer l'action magnétique d'un courant continu, comme il est du reste facile de le vérifier dans mes expériences, à l'aide de la spire témoin.

D'autre part, l'ordre de grandeur de ces déviations s'accorde bien avec celui calculé pour la convection électrique lorsque celles-ci seraient faibles, mais elle n'augmente pas avec les conditions qui feraient croître cette convection.

Je n'ai pu, en effet, obtenir plus de 12^{mm} à 14^{mm} , alors même que la convection aurait dû donner 175^{mm} .

Étude de ces déviations. — En procédant par tâtonnement j'ai constaté les faits suivants au sujet de ces déviations :

1° Elles disparaissent dès qu'on met une seconde couche métallique contre le secteur d'étain fixe, en l'interposant entre ce secteur et l'aiguille aimantée ;

2° Elles diminuent si l'aiguille aimantée se trouve en face d'une coupure pratiquée entre deux secteurs fixes reliés au sol symétriquement ;

3° Elles disparaissent si l'on remplace le secteur d'étain par une couche de graphite. On avait d'ailleurs vérifié que la capacité restait la même, ce qui prouvait bien que le secteur de graphite se chargeait ;

4° Elles augmentent dans une certaine mesure avec le nombre des coupures faites dans la couche dorée du disque tournant ;

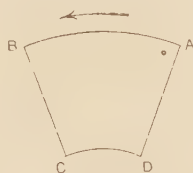
En doublant le nombre de ces coupures, les déviations passèrent de 6^{mm} à 12^{mm} . Mais en triplant ensuite le nombre des coupures, les déviations ne changèrent pas sensiblement ;

5° Enfin toute déviation disparaît si les secteurs fixes sont reliés au sol par plusieurs points de leur périphérie.

On peut déduire de ces faits l'explication suivante :

Considérons un des secteurs fixes ABCD (*fig. 15*) relié

Fig. 15.



au sol par le point A, et supposons que le disque tourne devant ce secteur dans le sens de la flèche. Au moment où le bord antérieur d'un secteur chargé arrive en AD, il y a, par influence, appel d'électricité du sol ; l'électrisation va se propager dans le secteur fixe avec la vitesse du disque, ce qui correspond à un courant de convection sans effet magnétique.

Quand le bord antérieur du secteur mobile arrive en BC, l'électricité induite sur le secteur fixe ne peut suivre le mouvement ; elle s'accumule donc en BC et il se crée, entre BC et AD, une différence de potentiel sous l'influence de laquelle l'électricité retournera par conduction vers A. On aurait ainsi un courant de conduction ouvert.

Il y aurait n de ces courants par seconde s'il passe n secteurs pendant cette période devant le secteur fixe.

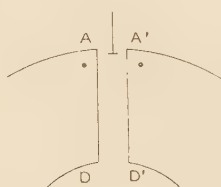
L'aiguille aimantée placée en face du milieu du secteur fixe déviara sous l'action de ces petits courants instantanés, tous de même sens.

L'électricité induite sur le secteur fixe est de signe contraire de celle du disque ; mais le courant auquel elle donne lieu circule en sens inverse de la rotation du disque. L'effet sur l'aiguille sera donc de même sens que celui attendu de la convection ; d'ailleurs cet effet changera de sens avec le signe de l'électrisation et le sens de la rotation du disque.

Si le secteur est relié au sol par plusieurs points ou par toute sa périphérie, il y aura des courants instantanés en tous sens, leur effet moyen sera nul.

Si l'aiguille aimantée se trouve entre deux secteurs reliés au sol par deux points tels que A et A' (*fig. 16*), les

Fig. 16.



courants instantanés circulant en sens inverse annuleront leurs effets.

Si le secteur fixe est une couche de graphite, la conductibilité extrêmement faible de cette couche diminuera considérablement les courants de conduction, l'effet disparaîtra.

Enfin, si derrière un secteur fixe d'étain on place une lame conductrice isolée, mais très rapprochée de la première, les courants instantanés de celle-ci développeront

par induction des courants de sens inverses dans la seconde lame, et l'effet sur l'aiguille aimantée sera nul.

Les faits semblent donc d'accord avec cette explication. Toutefois, elle implique l'existence de courants ouverts. La petitesse des déviations observées et l'incertitude qui en résulte font que je la donne sous toutes réserves ⁽¹⁾.

Résultat. — L'essentiel est que les déviations ne soient pas dues à la convection; et le résultat de cette nouvelle série paraît confirmer sur ce point les conclusions tirées des deux séries précédentes.

Objection de M. Potier. — M. Potier ⁽²⁾ a fait alors l'objection suivante :

Si on laisse de côté le résultat de la première expérience, ceux des deux autres laissent entière la question de l'effet magnétique de la convection électrique. Elles prouvent seulement qu'une erreur s'était glissée dans les expériences contradictoires.

« Suivant les idées de Maxwell et de Faraday, dit M. Potier, la force magnétique due à la convection électrique résulte de la propagation dans l'espace du trouble apporté dans la distribution de la force électrique par le mouvement d'un corps chargé; si donc on localise (par exemple en enfermant ce corps dans un conducteur creux, ou entre les armatures d'un condensateur) la région dans laquelle cette perturbation électrique peut se propager, on limitera en même temps la région où peut naître le champ magnétique. Si l'on veut s'en référer aux équations de Maxwell, on dira que la force électrique en dehors du conducteur est invariable et admet un potentiel quel que soit l'état de mouvement du corps électrisé; donc, la force

⁽¹⁾ Voir *Comptes rendus*, t. CXXXII, p. 1108, 1901, une expérience qui confirme cette explication ainsi que tous les autres résultats exposés dans ce Travail.

⁽²⁾ *Éclairage électrique*, t. XXV, p. 352; 1900.

magnétique est invariable ; ou bien l'on dira que le déplacement des charges à la surface interne du conducteur compense, au point de vue magnétique comme au point de vue électrostatique, l'effet du déplacement du corps électrisé. »

Tout en faisant des réserves sur cette interprétation, il n'est pas douteux que le rôle des armatures fixes, divisées ou non en secteurs, n'est pas facile à déterminer.

J'ai alors essayé de supprimer les plateaux fixes conducteurs de l'expérience précédente.

Expérience de vérification. — Pour que la convection électrique ait une valeur appréciable, il est nécessaire que les secteurs du disque tournant se chargent dans une capacité assez grande. J'ai donc entrepris de charger chaque secteur mobile entre deux secteurs fixes reliés au sol, puis de l'isoler et de le faire passer près du système astatique, sans qu'aucun écran métallique soit interposé entre le disque et ce système.

Le secteur se chargeait donc à 6000 volts dans une capacité assez grande, 140 C. G. S. Sa capacité à l'air libre, à grande distance de tout conducteur, se trouvait réduite à 7 C. G. S. ; le potentiel passait, par suite, de 6000 à 120 000.

Comme, d'ailleurs, le passage de la grande à la petite capacité présentait une période intermédiaire pendant laquelle la distribution variait très rapidement sur le secteur mobile, il en résultait des étincelles et des aigrettes qui le déchargeaient presque complètement.

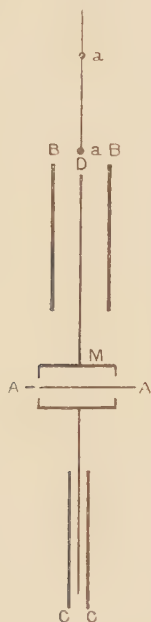
Après d'assez longs tâtonnements, j'ai introduit une sorte de capacité intermédiaire.

Voici une description sommaire de l'appareil :

Le disque d'ébonite D de l'expérience précédente (*fig.* 17) est doré suivant trois secteurs SS (*fig.* 18) ; chaque secteur communique par une bande dorée avec un plot *p* placé

sur le moyeu M dans un noyau d'ébonite. Les secteurs sont très soigneusement isolés les uns des autres. Chacun d'eux est, en outre, divisé par de petits traits radiaux de 2^{mm} de

Fig. 17.



large en une série de petits secteurs, communiquant seulement par leur partie interne, ainsi que le montre une partie du secteur $S_1 S_1$ (fig. 18).

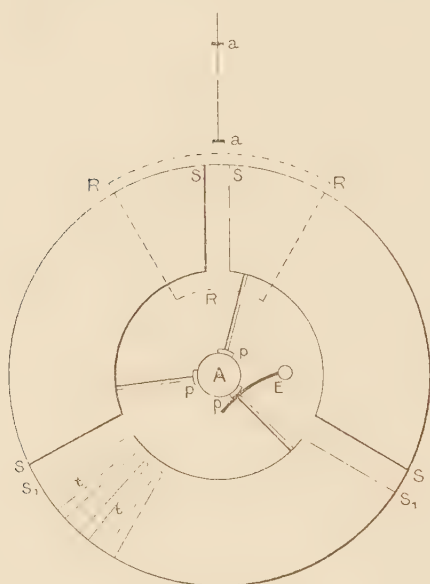
Le bâti de bronze de l'expérience précédente a été scié en deux et sa partie supérieure supprimée.

La moitié inférieure du disque est comprise entre deux plateaux de verre CC fixés au bâti de bronze et recouverts, sur leurs faces externes, de papier d'étain relié au sol. Les dimensions sont telles que la capacité électrostatique C. G. S. d'un secteur SS compris entre ces deux plateaux est sensiblement égale à 140.

La moitié supérieure du disque est comprise entre deux

plateaux d'ébonite BB, recouverts d'étain sur leurs faces

Fig. 18.



extérieures et distants du disque de 10^{mm} , de façon à pouvoir placer un système astatique au voisinage immédiat du disque et plus près de celui-ci que des plateaux fixes.

De plus, le papier d'étain qui recouvre ces plateaux a été enlevé suivant un secteur de 60° RRR, dont la bissectrice correspond à la région qu'on veut étudier avec le système astatique.

Un balai E permet de charger les secteurs; il est disposé de telle façon que chaque secteur se charge au moment où il est compris entre les plateaux inférieurs CC. Il s'isole ensuite et vient agir sur le système astatique. Les sillons *tt* sont destinés à limiter les courants de conduction qui se produisent dans chaque secteur par suite du passage de la grande capacité CC à la faible capacité BB.

Grâce à cette disposition, le secteur conservait toute sa charge et venait agir sur le système astatique placé dans la région RR, où les secteurs métalliques fixes sont supprimés.

J'ai essayé de placer sur le noyau un second balai, relié au sol et destiné à décharger les secteurs après qu'ils avaient quitté la région RR. En envoyant le courant ainsi collecté dans un galvanomètre, on aurait pu mesurer exactement l'intensité de la convection.

De plus, on aurait pu envoyer le même courant dans la spire témoin, ce qui aurait été une excellente vérification.

Le collecteur fonctionnait bien pour de petites vitesses (8 à 10 tours par seconde). Pour de plus grandes, il n'en était plus de même. La charge et la décharge étant oscillantes n'avaient plus le temps de se produire. Le courant collecté était égal au vingtième de ce que le calcul indiquait.

Ce balai collecteur n'avait plus d'autre effet que de diminuer la charge moyenne de chaque secteur.

J'ai donc renoncé à cette disposition.

Spire témoin. — La spire témoin ne pouvait plus être placée comme précédemment. J'ai fait faire une spire de tube de verre de 31^{cm} de diamètre dans laquelle la spire conductrice a été fixée. Le cercle ainsi formé a été placé au-dessus du système astatique, à une distance de l'aiguille supérieure de celui-ci égale à la distance de la région moyenne du disque à l'aiguille inférieure.

Système astatique. — Pour que l'expérience fût absolument à l'abri de l'objection qui l'a déterminée, il aurait fallu que le système astatique ne fût séparé par aucune couche métallique du disque tournant. Il fallait donc supprimer l'écran électrique relié au sol, qui le protégeait dans les expériences précédentes. Mais il était alors soumis à des actions électrostatiques assez intenses.

Pour y remédier, j'ai essayé de placer le système dans le plan du disque tournant et de lui donner une forme telle que les actions électrostatiques restent les mêmes quelle que soit la rotation effectuée par le système autour de son axe. J'ai essayé les dispositions suivantes :

Fixer à la base de la lame de mica une demi-sphère d'aluminium dont un plan diamétral coïncide avec le plan de la lame.

Constituer le système par un cylindre d'aluminium creux, extrêmement léger, les aimants étant fixés suivant un diamètre de chacune des bases.

Constituer le système par une tige métallique cylindrique, terminée par deux petites sphères creuses dans l'intérieur desquelles se trouvaient les aiguilles aimantées. Toutes ces dispositions ont été insuffisantes. Elles diminuaient les déviations d'origine électrostatique, mais ne les supprimaient pas.

J'ai alors placé le système, constitué par une lame de mica et quatre aimants, dans un tube de papier graphité. L'ensemble était placé de façon que le plan de la lame coïncidât avec le plan du disque.

Premiers résultats. — Les données expérimentales étaient les mêmes que dans la série précédente, et les déviations attendues identiques.

La première fois que j'ai fait l'expérience, j'attendais des déviations de 30^{mm} en inversant le signe de la charge.

Or, après avoir vérifié que la charge du disque au repos n'influit pas sur le système astatique, j'ai obtenu, en chargeant le disque tournant, des déviations de 35^{mm} environ, se produisant dans le sens attendu et réversibles avec le signe de la charge et le sens de la rotation.

D'ailleurs, ces déviations semblaient suivre assez bien la proportionnalité avec le nombre de tours du disque et le potentiel de sa charge.

Vérification. — Pour établir nettement la cause de ces déviations, j'ai d'abord placé l'aiguille inférieure du système astatique au niveau de la région moyenne de la partie dorée du disque tournant, à 15^{mm} en avant du disque. Dans cette position, l'action électromagnétique de cette partie dorée devrait être minimum. En tenant compte de l'action produite sur l'aiguille supérieure du système, la déviation aurait dû être le quart de l'action observée dans la première position.

L'action observée fut sensiblement le double de celle obtenue dans cette première position.

Ceci constaté, je vérifiais que les déviations ne s'accordaient avec celles de la convection dans aucune autre position que la première.

Je pensai alors qu'elles pouvaient être d'origine purement électrostatique, l'écran de papier graphité ne suffisant pas pour des charges animées de mouvements rapides.

Je vérifiais en effet les points suivants :

Les déviations diminuent beaucoup si l'on a soin de désélectriser la lame de mica du système astatique.

On peut les augmenter graduellement en donnant à cette lame des charges croissantes.

D'ailleurs, pour un même sens de la rotation du disque et un même signe de sa charge, le sens de la déviation se renverse si l'on inverse le signe de la charge de la lame de mica.

Les déviations restent identiques si l'on supprime sur la lame de mica les aiguilles aimantées. Toutefois, on fait disparaître ainsi certaines impulsions, de caractère accidentel, réversibles avec le signe de la charge et le sens de la rotation du disque, et dont j'indiquerai plus loin la cause.

Enfin, les déviations disparaissent si l'on substitue à

l'écran de papier graphité un écran de cuivre mince ou même de papier recouvert d'une feuille d'étain.

Il n'est donc pas douteux que ces déviations sont d'origine électrostatique.

Toutefois, si la réversibilité avec le signe de la charge s'explique bien ainsi, il n'en est pas de même de la réversibilité avec le sens de la rotation.

Pour comprendre ce dernier fait, il faut admettre que la lame de mica se polarise et se comporte comme une tige isolante suspendue par son milieu et portant à ses extrémités des charges de signes contraires fixées à leurs positions respectives.

Cette interprétation a été vérifiée par le fait suivant :

En remplaçant la lame de mica par une lame d'aluminium de dimensions identiques, placée dans l'écran de papier graphité, et préalablement chargée, on obtenait des déviations réversibles avec le signe de la charge du disque, mais non réversibles avec le sens de la rotation.

Restaient enfin les impulsions accidentelles observées quand la lame de mica ou d'aluminium portait les aiguilles aimantées.

Ces impulsions, de grandeur variable, se produisaient au moment précis où l'on changeait le signe de la charge du disque, mais il arrivait souvent aussi que cette inversion de charge n'était pas accompagnée de ces impulsions.

Leur sens était en outre à *peu près* exactement réversible avec le signe de la charge et le sens de la rotation.

Enfin il arrivait quelquefois que le spot ne revenait pas à son zéro primitif et restait toujours un peu du côté où avait eu lieu l'impulsion.

Du reste il n'y avait aucune relation entre la grandeur des impulsions et les conditions de chaque expérience.

Tous ces caractères portaient à penser que ces dévia-

tions étaient dues à des étincelles éclatant entre le disque et ses armatures au moment de l'inversion de charge.

Cependant ces armatures sont en ébonite, et dépourvues de papier d'étain dans toute la partie avoisinant l'aiguille aimantée.

D'ailleurs on ne voyait et n'entendait aucune étincelle même en se plaçant au voisinage immédiat du disque.

Mais en se mettant dans l'obscurité à peu près complète, on put voir, au moment de l'inversion de charge, des sortes d'aigrettes à peine lumineuses, marquées seulement à la surface du disque par un point plus brillant, continué par une traînée diffuse. Ces aigrettes éclataient dans la région des plateaux fixes dépourvues de papier d'étain. Il fut d'ailleurs possible de constater que les impulsions coïncidaient toujours avec la production de ces aigrettes.

Ceci permet donc d'expliquer toutes les particularités observées.

Quant aux faibles déviations permanentes constatées parfois après ces impulsions, elles sont dues à la faible valeur du couple directeur du système magnétique, dont le fil de suspension n'a d'ailleurs aucune torsion appréciable.

CONCLUSIONS RELATIVES AUX DEUX DERNIÈRES EXPÉRIENCES.

Je résumerai ainsi l'ensemble des deux dernières séries d'expériences que je viens de décrire.

1° Un disque tournant chargé ne dévie pas l'aiguille aimantée comme le ferait prévoir l'hypothèse de l'effet magnétique de la convection électrique.

2° Dans cette forme d'expérience il existe de très nombreuses causes d'erreur, de nature telle que leurs effets se confondent le plus souvent avec ceux attendus du phénomène expérimenté, comme sens et comme ordre de grandeur.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES.

J'ai établi expérimentalement les faits suivants :

1° Un corps électrisé, placé dans une région qui est le siège de variations magnétiques, n'est soumis à aucune force pondéromotrice ;

2° Un disque tournant dans des conditions telles qu'on est sûr qu'il entraîne avec lui toute charge électrique qu'on lui communique, ne donne pas, quand on fait varier cette charge, les effets d'induction que donnerait un courant de conduction transportant des quantités d'électricité égales et soumis à des variations du même ordre.

3° Ce même disque tournant, chargé d'une manière constante, ne produit pas le champ magnétique d'un courant de conduction transportant la même quantité d'électricité.

Je me bornerai à ces points de fait.

Par leur délicatesse et leurs difficultés⁴ les expériences qui ont servi à les établir sont de celles dont il est imprudent de généraliser trop vite les résultats.

Tout ce travail expérimental a été fait au Laboratoire des Recherches Physiques.

Je tiens à témoigner ici ma profonde reconnaissance à M. le Professeur Lippmann, directeur du Laboratoire, qui m'a mis sur la voie de ces recherches.

L'intérêt que M. le Professeur H. Poincaré a bien voulu prendre à mes recherches, dès qu'il les a connues, a été pour moi un précieux concours. C'est guidé par lui que j'ai fait presque toutes les vérifications qui peuvent donner quelque valeur aux résultats obtenus, je le prie d'accepter l'expression de toute ma gratitude.

Je remercie aussi mes Maîtres de la Sorbonne, M. Bouty et M. Pellat, dont les conseils ne m'ont jamais manqué et qui ont mis à ma disposition tous les appareils de leurs laboratoires. En particulier, l'usage que j'ai pu faire de la

batterie d'accumulateurs que M. Bouty a fait installer et qu'il a si obligeamment mise à ma disposition a été, par la constance des potentiels de charge qu'elle fournit, un des principaux facteurs de ma réussite.

Je ne saurais terminer sans remercier aussi tous ceux qui ont bien voulu m'aider de leurs conseils et de leurs critiques : M. Carvallo qui n'a cessé de me soutenir et de me guider pendant ces quatre années de recherches ; M. Blondlot et M. Potier, dont les objections et les conseils m'ont permis d'élucider plusieurs points obscurs.

Enfin, dans la réussite de mes expériences, une très grande part est due au dévouement de tout le personnel du Laboratoire des Recherches, et c'est pour moi un devoir agréable que de lui rendre ici un hommage mérité en l'assurant de ma grande reconnaissance.

Vu et approuvé :

Paris, le 1^{er} mai 1901.

POUR LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

L'Assesseur :

G. LIPPMANN.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 1^{er} mai 1901.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

GRÉARD.



TABLE DES MATIÈRES.

	Pages
INTRODUCTION.....	I

PREMIÈRE PARTIE.

CHAMP ÉLECTRIQUE PRODUIT PAR DES VARIATIONS MAGNÉTIQUES.....	5
Expérience de M. Lodge.....	6
Grandeur de la force à mesurer.....	8
Description des appareils.....	10
Mode d'expérimentation.....	28
Valeurs numériques et mesures.....	31

DEUXIÈME PARTIE.

RECHERCHES SUR L'EFFET MAGNÉTIQUE DE LA CONVECTION ÉLECTRIQUE.	35
Premières expériences de M. Rowland.....	35
Expériences de M. Lecher.....	38
Expériences de M. Himstedt.....	39
Secondes expériences de MM. Rowland et Hutchinson.....	42
Expériences sur l'effet d'induction électromagnétique de la con- vection électrique.....	46
Description des appareils.....	47
Disposition générale des appareils.....	69
Étalonnage de l'appareil.....	73
Calcul des déviations attendues.....	78
Mesures des constantes.....	79
Objections et vérifications.....	83
Résultats numériques.....	90

TROISIÈME PARTIE.

Répétition des expériences de M. Rowland.....	95
Objection de M. Potier et vérification.....	107
CONCLUSIONS.....	115

SECONDE THÈSE.

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

La Physiologie du ferment alcoolique.

Vu et approuvé :

Paris, le 1^{er} mai 1901.

POUR LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

L'Assesseur :

G. LIPPMANN.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 1^{er} mai 1901.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

GRÉARD.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,
30255 Quai des Grands-Augustins, 55.
